

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Aplikace software pro převedení výsledků měření antén  
analyzátozem ESPI 7 do počítače**

**Antennas Analyzer ESPI 7 Software Application for Converting  
Measurement Results to the PC**

**2014**

**Bc. Petr Vaško**

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Petr Vaško**

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Aplikace software pro převedení výsledků měření antén analyzátozem  
ESPI7 do počítače.

Antennas Analyzer ESPI7 Software Application for Converting  
Measurement Results to the PC.

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s analyzátozem ESPI7.
2. Prostudujte literaturu, týkající se měření antén, kterou vám doporučí vedoucí diplomové práce.
3. Aplikujte software pro vyčítání měřených dat z měřicího přístroje a pro jejich ukládání do počítače.
4. Software ověřte na datech získaných při měření antén.
5. Napište manuál pro použití softwaru.

Seznam doporučené odborné literatury:

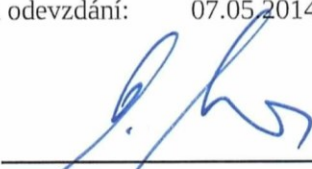
1. Manuál analyzátoru ESPI.
2. Procházka, M.: Antény encyklopedická příručka, 3. rozšířené vydání, BEN, Praha, 2005, ISBN 80-7300-166-7
3. Další literatura podle doporučení vedoucího práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Lubomír Ivánek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 25. 4. 2014



.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych velmi poděkoval doc. Ing. Lubomíru Ivánkovi, CSc. a Ing. Petru Orságovi, Ph.D za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Jáně Matejčíkové za možnost zrealizovat měření na vyrobené anténě, která je součástí jeho bakalářské práce „Návrh magnetické smyčkové antény“. Poděkování určitě patří také Tomáši Bydžovskému ze společnosti ROHDE & SCHWARZ - Praha, s. r. o, který mi ochotně poskytl možnost konzultace ohledně problematiky spektrálního analyzátoru ESPI 7.

## **Abstrakt**

Diplomová práce pojednává o možnostech vzdálené komunikace se spektrálním analyzátozem ESPI 7 s využitím LAN sítě. První variantou je ovládání analyzátoru s využitím vzdálené plochy. Druhou je potom zprovoznění komunikace pomocí bezplatného softwaru, který umožňuje provádět měření přímo na obrazovce počítače či notebooku s výhodou rychlého uložení měřených výsledků v grafické nebo datové podobě.

V práci je nejdříve rozebrána problematika šíření elektromagnetických vln, jejich rozdělení. Je zde vysvětlen také princip elektromagnetické kompatibility a základní normy. Následuje detailní popis spektrálního analyzátoru ESPI 7 a příslušenství, které bylo použito při měření. Praktickou část potom tvoří optimalizace konfigurace softwaru pro vzdálenou komunikaci s analyzátozem. Vybrané aplikace poskytované výrobcem analyzátoru byly nainstalovány, zprovozněny a testovány na notebooku s operačním systémem Windows 7. Je zde uveden jejich popis, detaily jednotlivých měření a návrhy laboratorních úloh pro studenty.

## **Klíčová slova**

Spektrální analyzátor, můstek, anténa, vzdálená komunikace, software, FreRes, RSCommander, ESPI 7, LAN.

## **Abstract**

The diploma thesis deals with the possibilities of remote communication with a spectrum analyzer ESPI 7 using the LAN network. The first option is operating the analyzer using a remote desktop. The second option then is to put into operation communication by using the free software that allows to make measurements directly on the screen of a computer or a notebook with the advantage of quick saving of measurement results in graphical or data form.

The thesis first analyzes problems of the propagation of electromagnetic waves and their distribution. It also explains the principle of electromagnetic compatibility and basic standards. The following is the detailed description of the spectral analyzer ESPI 7 and attachments that were used in the measurement. The practical part then consists of optimization of configuration of the software for remote communication with the analyzer. The selected applications provided by the manufacturer of the analyzer were installed, put into operation, and tested on a laptop with the operating system Windows 7. Their descriptions, the details of individual measurements and suggestions of the laboratory tasks for students are presented here.

## **Key words**

Spectrum Analyzer, Bridge, Antenna, Remote Communication, Software, FreRes, RSCommander, ESPI 7, LAN.

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>B</b>	T	Magnetická indukce
<b>D</b>	$\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$	Elektrická indukce
<b>E</b>	$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$	Intenzita elektrického pole
<b>H</b>	$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$	Intenzita magnetického pole
<b>I</b>	A	Elektrický proud
<b>J</b>	$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$	Proudová hustota
<b>Q</b>	C	Elektrický náboj
<b>U</b>	V	Elektrické napětí
<b>Z</b>	$\Omega$	Impedance
<b>c</b>	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	Rychlost světla
<b>f</b>	Hz	Frekvence
<b>t</b>	s	Čas
<b><math>\mu</math></b>	$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$	Permeabilita
<b><math>\varepsilon</math></b>	$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$	Permitivita
<b><math>\gamma</math></b>	$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$	Měrná elektrická vodivost
<b><math>\lambda</math></b>	m	Vlnová délka
<b><math>\rho</math></b>	$\text{C}\cdot\text{m}^{-3}$	Nábojová hustota
<b><math>\phi</math></b>	Wb	Magnetický tok

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
<b>BNC</b>	Bayonet Neill Concelman Connector
<b>CISPR</b>	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
<b>DFT</b>	Discrete Fourier Transform
<b>DHCP</b>	Dynamic Host Configuration Protocol
<b>DSP</b>	Digital Signal Processing
<b>EMC</b>	Electromagnetic Compatibility
<b>EMI</b>	Electromagnetic Interference
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>NI</b>	National Instruments
<b>RAM</b>	Random-Access Memory
<b>RDP</b>	Remote Desktop Protocol
<b>SWR</b>	Standing Wave Ratio
<b>TG</b>	Tracking Generator
<b>USB</b>	Universal Serial Bus
<b>UTP</b>	Unshielded Twisted Pair
<b>WD</b>	Western Digital
<b>Wi-Fi</b>	Wireless Fidelity



# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1. ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN .....</b>	<b>12</b>
1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY .....	12
1.2 DEFINICE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE POMOCÍ MAXWELLOVÝCH ROVNIC.....	13
1.3 ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ PROSTŘEDÍM .....	14
1.4 ŠÍŘENÍ ROVINNÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY .....	15
1.5 POLARIZACE ELEKTROMAGNETICKÉ VLNY .....	19
1.6 PŘENOS ENERGIE - POYNTINGŮV VEKTOR .....	20
1.7 ROZDĚLENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN DLE UŽITÍ.....	20
1.8 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA EMC - DRUHY CIVILNÍCH NOREM.....	21
<b>2. SPEKTRÁLNÍ ANALYZÁTORY .....</b>	<b>24</b>
2.1 ZÁKLADNÍ POPIS A ROZDĚLENÍ .....	24
2.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY .....	25
2.3 ČÍSLICOVÉ SPEKTRÁLNÍ ANALYZÁTORY .....	25
2.4 SPEKTRÁLNÍ ANALYZÁTOR ESPI 7 .....	28
<b>3. PŘÍSLUŠENSTVÍ POUŽITÉ K MĚŘENÍ .....</b>	<b>32</b>
3.1 SWR MŮSTEK ZRB 2.....	32
3.2 SADA MĚŘÍCÍCH SOND PRO MĚŘENÍ BLÍZKÉHO POLE VELIČIN E A H.....	36
3.3 ANTÉNY.....	38
<b>4 REALIZACE VZDÁLENÉ KOMUNIKACE S ANALYZÁTOREM ESPI 7 V LAN SÍTÍ..</b>	<b>42</b>
4.1 ZÁKLADNÍ KONFIGURACE ANALYZÁTORU ESPI 7 .....	42
4.2 VZDÁLENÉ OVLÁDÁNÍ A KOMUNIKACE SE SPEKTRÁLNÍM ANALYZÁTOREM ESPI 7 .....	44
4.3 REALIZACE VZDÁLENÉ KOMUNIKACE S POUŽITÍM R&S SOFTWARE.....	48
<b>5 NÁVRH LABORATORNÍCH ÚLOH.....</b>	<b>56</b>
5.1 MĚŘENÍ KOEFICIENTU ODRAZU ANTÉN S APLIKACÍ R&S FRERES.....	56
5.2 MĚŘENÍ KOEFICIENTU ODRAZU ANTÉNY S APLIKACÍ R&S RSCOMMANDER.....	63
<b>6 MĚŘENÍ KOEFICIENTU ODRAZU U MAGNETICKÉ SMYČKOVÉ ANTÉNY .....</b>	<b>67</b>
6.1 ÚVOD.....	67
6.2 PŘÍPRAVA A KALIBRACE MĚŘENÍ .....	68
6.3 PRŮBĚH SPOLEČNÉHO MĚŘENÍ.....	69

<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>74</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>75</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>76</b>

# Úvod

Komunikační a informační technologie zasahují stále více do všech oblastí našeho života, proto si v současné době nedokážeme představit naši existenci bez jejich používání. Nedílnou část zde bezesporu tvoří bezdrátové technologie, které jsou využívány pro realizaci rozličných typů spojení, komunikací, šíření rozhlasového i televizního signálu. Velkou výhodou zmíněných technologií je bezesporu to, že k šíření signálu je využito atmosféry, není tedy zapotřebí realizovat nákladné optické nebo metalické kabelové trasy. Šíření atmosférou však přináší i své nevýhody. Tyto systémy jsou velmi citlivé na rušení a překážky umístěné ve směru šíření signálu. Vždy je tedy zapotřebí řešit odolnost technologií vůči těmto faktorům, které přenášený signál zkreslují nebo nějakým způsobem deformují.

Anténní systémy, které jsou používány k šíření vysokofrekvenčního signálu, musí pracovat s co nejvyšší mírou efektivity. V praxi to znamená, že přeměna energie musí proběhnout na dané frekvenci s nejmenší možnou ztrátou, toho většinou docílíme přesným návrhem (rozměry) dané antény. Důležitým parametrem, který také určuje velikost ztrát (zpětných odrazů) je přizpůsobení antény k napájecímu vedení. Snahou tedy je, dosáhnout co nejlepší míru přizpůsobení, aby byla ztrátovost při přenosu signálu minimální.

Jedním z důležitých parametrů tedy je i měření velikosti koeficientu odrazu antén, kterým se zabývá též praktická část této diplomové práce. K realizaci měření byl použit spektrální analyzátor ESPI 7 a SWR můstek ZRB 2. Důraz je zde kladen hlavně na možnosti zpracování naměřených hodnot s využitím softwaru v grafické či datové podobě přímo na notebooku (počítači), který komunikuje s analyzátozem vzdáleně přes LAN.

# 1. Šíření elektromagnetických vln

Vzhledem k tomu, že realizovaná měření pomocí spektrálního analyzátoru ESPI 7 budou v praktické části prováděna s využitím zvolených typů antén, zmíním se zde o základních vlastnostech šíření elektromagnetických vln a o normách s tím spojených.

## 1.1 Úvod do problematiky

Elektromagnetická energie, která se přenáší od zdroje signálu k přijímači, je nazývána elektromagnetickým vlněním. Přenos energie probíhá sice velkou, ale však konečnou rychlostí. Vždy se jedná o kombinaci vlnění magnetického a elektrického. Elektromagnetické vlnění vyzařuje každý elektrický náboj s nenulovým zrychlením. Elektrická složka je definována vektorem intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$  a magnetická složka vektorem magnetické indukce  $\mathbf{B}$ . Elektromagnetické vlnění je možné charakterizovat jako vlnu, která má určitou rychlost šíření, vlnovou délku a frekvenci. V druhé polovině 19. století došel J. C. Maxwell k závěru, že elektromagnetický rozruch se šíří stejnou rychlostí jako světlo a jedná se vlastně o jeden z druhů elektromagnetického vlnění (příčné vlnění). Vztah (1.1) pro výpočet velikosti rychlosti světla  $c$  ve vakuu

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}, \quad (1.1)$$

kde  $\epsilon_0$  je permitivita vakua ( $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ ) a  $\mu_0$  je permeabilita vakua ( $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ ). Níže je uveden vztah (1.2) pro výpočet vlnové délky  $\lambda$  elektromagnetického vlnění

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1.2)$$

kde  $f$  je frekvence zdroje signálu (generátoru).

Komplexní vyjádření zákonů elektromagnetického pole je možné pomocí Maxwellových rovnic, kdy se jedná o vzájemné obecné souvislosti mezi veličinami, které popisují toto pole v každém místě prostoru.

## 1.2 Definice elektromagnetického pole pomocí Maxwellových rovnic

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, Maxwellovy rovnice popisují souhrnně zákonitosti elektromagnetického pole. Celou teorii elektromagnetického pole, která byla vypracována J. C. Maxwellem lze tedy shrnout do následující soustavy čtyř rovnic, které v integrálním tvaru jsou uvedeny zde [1]:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{zdroj} + I_{ind} + d\psi/dt \quad (1.3)$$

- ❖ První rovnice (1.3) je vyjádřením Ampérova zákona celkového proudu. Složky vodivého proudu tvoří zdroj vlnění  $I_{zdroj}$ , indukované elektrické pole  $I_{ind}$  a posuvný proud  $d\psi/dt$ .

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -d\phi/dt \quad (1.4)$$

- ❖ Druhá rovnice (1.4) je představením Faradayova indukčního zákona, kdy časová změna magnetického toku  $\phi$ , který prochází plochou, která je omezena uzavřenou křivkou  $l$ , je tak vázána s cirkulací vektoru elektrického pole  $\mathbf{E}$  po této křivce.

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q \quad (1.5)$$

- ❖ Třetí rovnice (1.5) vyjadřuje Gaussovu větu elektrostatiky pro tok elektrické indukce  $\mathbf{D}$ . Je vyvolán nábojem  $Q$  uvnitř objemu, který je uzavřen plochou  $\mathbf{S}$ .

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (1.6)$$

- ❖ Čtvrtá rovnice (1.6) popisuje zákon spojitosti siločar magnetického pole, kdy výtok vektoru magnetické indukce  $\mathbf{B}$  z uzavřené plochy je nulový, potom magnetické siločáry jsou do sebe uzavřenými křivkami.

V lineárním izotropním prostředí potom platí mezi jednotlivými veličinami tyto vztahy [1]

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \mathbf{E}, \quad (1.7)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \mathbf{H}, \quad (1.8)$$

kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vakua ( $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ ),  $\varepsilon_r$  je relativní permitivita,  $\mu_0$  permeabilita vakua ( $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ ) a  $\mu_r$  je relativní permeabilita. Permitivita prostředí  $\varepsilon$  a permeabilita  $\mu$  jsou zde konstantami úměrnosti.

Vektor plošné hustoty vodivého proudu  $\mathbf{J}$  je přímo úměrný vektoru intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$ , kdy platí [1]

$$\mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E} \quad (1.9)$$

Vodivý proud  $\mathbf{J}$  je vyvolán elektrickým polem působícím ve vodivém prostředí, kdy konstantou úměrnosti je zde měrná vodivost prostředí  $\gamma$ .

Maxwellovy rovnice (1.3) až (1.6) vyjádřené v diferenciálním tvaru [1]

$$\text{rot}\mathbf{H} = \mathbf{J}_{\text{zdroj}} + \mathbf{J}_{\text{ind}} + \partial\mathbf{D}/\partial t \quad (1.10)$$

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t \quad (1.11)$$

$$\text{div}\mathbf{D} = \rho \quad (1.12)$$

$$\text{div}\mathbf{B} = 0 \quad (1.13)$$

V diferenciálním vyjádření jsou složky vodivého proudu zaměněny za odpovídající proudové hustoty a náboj  $Q$  za objemovou hustotu náboje  $\rho$ . Tímto způsobem jsou popsány jevy pouze v oblastech, kde jednotlivé vektory veličin jsou spojitě a diferencovatelné. Díky tomu je soustava diferenciálních rovnic (1.10) až (1.13) snáze řešitelná, vyžaduje ale doplnění o okrajové podmínky.

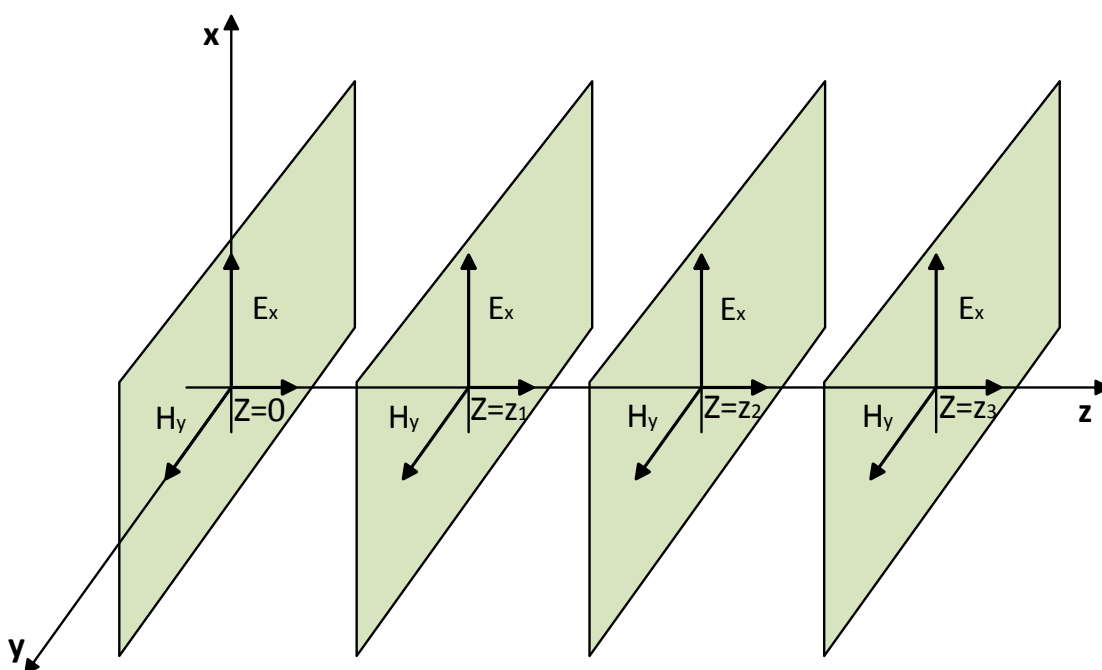
### 1.3 Šíření elektromagnetického vlnění prostředím

Šíření elektromagnetické vlny ze zdroje záření v homogenním izotropním prostředí ve vzdáleném poli vždy probíhá ve formě kulových vlnoploch. Jejich struktura se může vždy lišit, protože se pokaždé šíří v jiných podmínkách. Jedná se hlavně o prostorovou orientaci vektorů intenzity elektrického a magnetického pole vůči směru šíření. Leží-li vektory  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  v rovině kolmé na směr šíření, hovoříme o tzv. příčné elektromagnetické vlně.

Ve velkých vzdálenostech od zdroje záření, je zakřivení kulové vlnoplochy malé. V dostatečné vzdálenosti od zdroje tedy můžeme v zjednodušeném pohledu považovat část kulové vlnoplochy za rovinu, pak hovoříme o rovinné elektromagnetické vlně.

## 1.4 Šíření rovinné elektromagnetické vlny

Vlnoplochami rovinné vlny jsou rovnoběžné roviny, které jsou kolmé na směr šíření vlny. Pro názornost uvažujme elektromagnetickou vlnu šířící se prostorem ve směru osy  $z$ , elektrické pole směřuje ve směru osy  $x$  a magnetické pole ve směru osy  $y$ , jak ukazuje obr. 1.1.



Obr. 1.1: Příklad šíření rovinné elektromagnetické vlny

Jedná se o ukázkou rovinné vlny, kdy v libovolném okamžiku jsou vektory  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  stejnorodé a jsou v jakékoli rovině kolmé vůči směru šíření vlny. Jelikož jsou obě pole kolmá ke směru šíření, jedná se i o vlnu příčnou.

Uvažujeme-li harmonický průběh veličin, bude popis časové závislosti obsahovat pouze harmonické funkce a při řešení diferenciálních rovnic, pak tato volba umožní zavedení fázorů a odstranění závislosti na čase. Budeme se zabývat pouze jednou proměnnou a to souřadnicí  $z$ .

Dostáváme tedy dvě základní rovnice, kde u první je časové a prostorové rozložení intenzity elektrického pole  $E$  definováno vztahem [2]

$$E_x(z, t) = E_m \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cdot \sin(\omega \cdot t - \beta \cdot z + \varphi_0) \quad (1.14)$$

Časové a prostorové rozložení intenzity magnetického pole  $H$  je definováno pak vztahem [2]

$$H_y(z, t) = H_m \cdot e^{-\alpha \cdot z} \cdot \sin(\omega \cdot t - \beta \cdot z - \varphi_z + \varphi_0) \quad (1.15)$$

Za předpokladu, že uvažujeme nyní rovinu, která prochází počátkem, tedy  $z = 0$  a dle obr. 1.1 bude intenzita elektrického pole směřovat pouze ve směru osy  $x$  a intenzita magnetického pole pouze ve směru osy  $y$  (bude platit v každém místě této zvolené roviny), budou mít výše uvedené rovnice (1.14), (1.15) tvar [2]

$$E_x(z = 0, t) = E_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad (1.16)$$

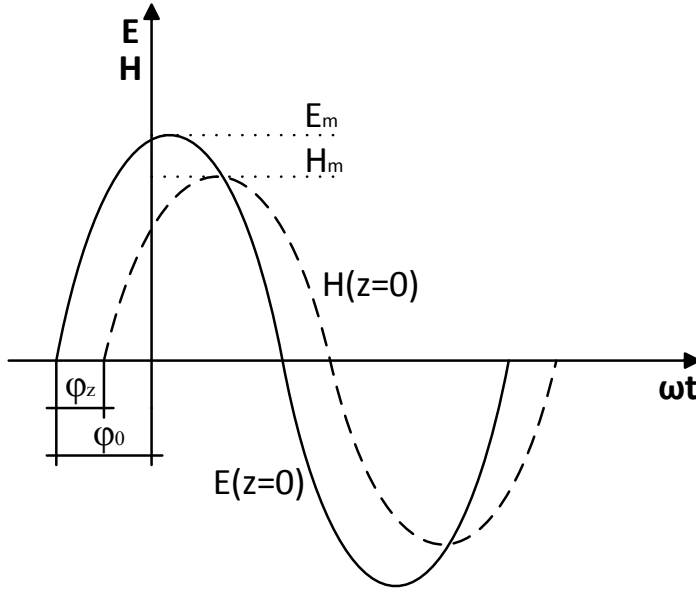
$$H_y(z = 0, t) = H_m \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_z + \varphi_0) \quad (1.17)$$

Z uvedených rovnic (1.16), (1.17) je zřejmé, že jde o obyčejné harmonické průběhy, kdy se amplitudy  $E_m$  a  $H_m$  mění s úhlovým kmitočtem  $\omega$ , obr 1.2. Úhel  $\varphi_0$  potom udává okamžitou hodnotu intenzity elektrického pole pro bod  $z = 0$  a čas  $t = 0$ . Jedná se o vztažnou hodnotu, na jejímž základě je možné pak vypočítat intenzitu elektrického a magnetického pole (1.18) v jakémkoli místě a čase [2]

$$E_x(z = 0, t = 0) = E_m \cdot \sin \varphi_0 \quad (1.18)$$

Zpoždění průběhu intenzity magnetického pole za intenzitou elektrického pole nám udává fázové zpoždění úhel  $\varphi_z$ . Tento úhel je v dielektrickém prostředí (materiálu) nulový, protože zde nevznikají žádné ztráty.





Obr. 1.2: Časový průběh veličin pro  $z = 0$  [2]

Rovnicemi (1.19), (1.20) dále provedeme výpočet pro následující rovinu  $z_l$ , kdy vyjdeme z rovnic (1.14), (1.15) a dosadíme zde  $z = z_l$  [2]

$$E_x(z_l, t) = E_m \cdot e^{-\alpha \cdot z_l} \cdot \sin(\omega \cdot t - \beta \cdot z_l + \varphi_0) \quad (1.19)$$

$$H_y(z_l, t) = H_m \cdot e^{-\alpha \cdot z_l} \cdot \sin(\omega \cdot t - \beta \cdot z - \varphi_z + \varphi_0) \quad (1.20)$$

Z obr. 1.3 je zřejmé, že v případě porovnání obou časových průběhů intenzity  $E$  na rovinách  $z$  a  $z_l$  zde vznikne časové zpoždění průběhu roviny  $z = \beta \cdot z_l$  a také pokles amplitudy o  $e^{-\alpha \cdot z_l}$  krát.

Konstanta  $\alpha$  se nazývá měrný útlum (útlum amplitudy na dané vzdálenosti) a konstanta  $\beta$  se nazývá fázová konstanta (měrný fázový posun na jednotku délky). Obě konstanty jsou závislé na parametrech prostředí a na kmitočtu vlnění.

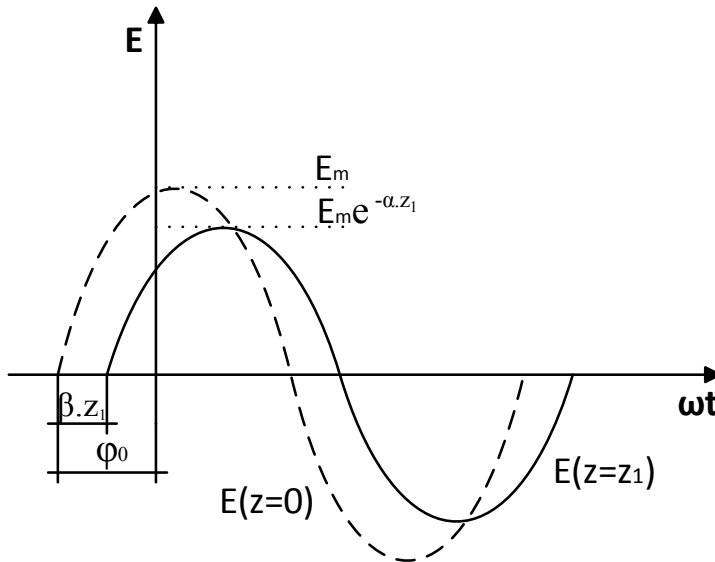
Budeme-li uvažovat časové průběhy na obr. 1.3 v následujících rovinách  $z_2, z_3, \dots$ , budou mít tyto průběhy stále menší amplitudu, větší fázové zpoždění, popř. opačnou fázi vůči průběhu  $z = 0$  a bude platit [2]

$$\beta \cdot z_2 = \pi \quad (1.21)$$

Na rovině  $z = z_3$  se může přihodit, že časový průběh splyne s průběhem  $z = 0$ , v tomto musí platit (1.22). Vzdálenost  $z_3$  se nazývá vlnová délka  $\lambda$  a výpočet se provede dle (1.23). Vlnová délka je vzdáleností dvou vlnoploch, na nichž kmitají veličiny elektromagnetického pole se shodnou fází [2].

$$\beta \cdot z_3 = 2\pi \quad (1.22)$$

$$\lambda = z_3 = \frac{2\pi}{\beta} \quad (1.23)$$



Obr. 1.3: Časový průběh v rovinách  $z = 0$ ,  $z = z_1$ ,  $z = z_2$  [2]

Charakteristická impedance je velmi důležitou veličinou udávající vztah mezi intenzitou elektrického a magnetického pole. Je možné ji přirovnat k impedanci používanou ve střídavých obvodech. Je určena jako podíl fázorů veličin, její jednotka je Ohm. Poměr nenulových složek intenzit pole  $E_x$  a  $H_y$  je roven charakteristické impedanci prostředí  $Z_0$  (1.24) [2]

$$Z_0 = \frac{E_x}{H_y} = \frac{E_0}{H_0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (1.24)$$

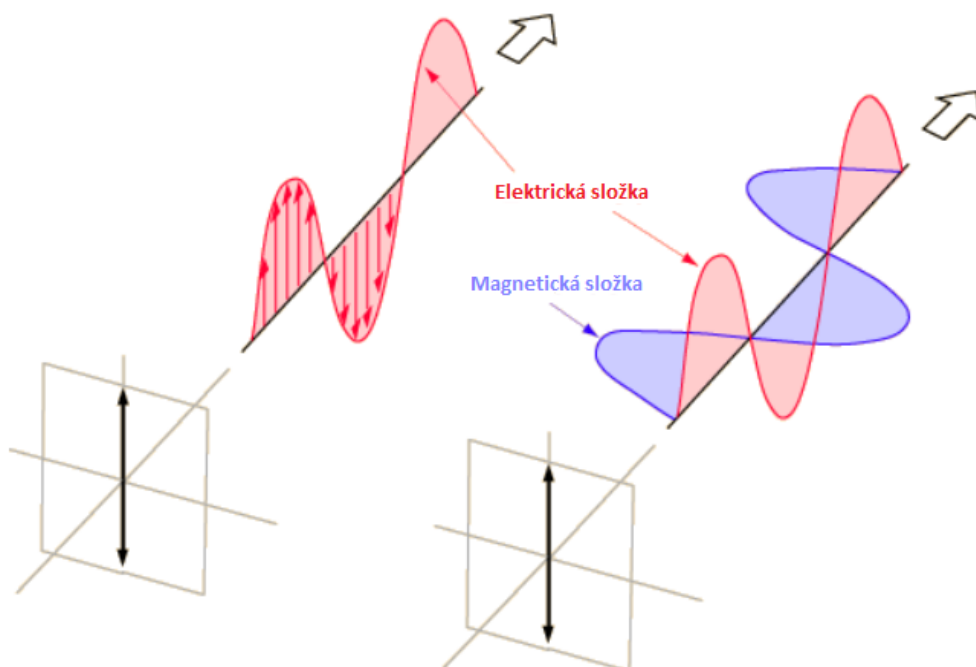
Ve volném prostředí, má hodnotu  $Z_0 = 120\pi \approx 377 \Omega$ .

Šíření elektromagnetických vln je z fyzikálního hlediska popsáno hyperbolickou parciální diferenciální rovnicí druhého řádu (1.25) s názvem vlnová rovnice, v tomto případě uvažujeme šíření vlny ve směru osy  $z$ , kde  $c^2$  je kvadrát rychlosti šíření vlny [2]

$$\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \Delta z \quad (1.25)$$

## 1.5 Polarizace elektromagnetické vlny

V případě, že se směr vektorů  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{B}$  u elektromagnetické vlny nemění, hovoříme o lineárně polarizované vlně, obr. 1.4. Polarizace vln při odrazu od rovinného rozhraní dvou prostředí je určena dle orientace vektoru intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$  dopadající vlny vzhledem k rovině dopadu. U rovnoběžně polarizované vlny je vektor intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$  rovnoběžný s rovinou dopadu a u kolmo polarizované vlny je vektor intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$  kolmý na rovinu dopadu. Orientace vektoru  $\mathbf{E}$  nemusí taková, že splňuje pouze jednu z těchto podmínek. Vlna potom má obě složky a to vertikálně i horizontálně polarizovanou.



Obr. 1.4: Lineárně polarizovaná vlna

## 1.6 Přenos energie - Poyntingův vektor

Poyntingův vektor představuje energii procházející jednotkou plochy za jednotku času, neboli jde o vektor hustoty toku elektromagnetické energie v prostoru, kdy tok výkonu je dán vektorovým součinem vektorů intenzit elektrického a magnetického pole  $\mathbf{E}$  a  $\mathbf{H}$  (1.26).

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad (1.26)$$

Velikost Poyntingova vektoru (1.27) v libovolném místě se rovná součinu rychlosti šíření vln a celkové hustoty energie.

$$S = c \cdot \frac{1}{2} (\epsilon_0 \times E^2 + \mu_0 \times H^2) = c \cdot \omega \quad (1.27)$$

## 1.7 Rozdělení elektromagnetických vln dle užití

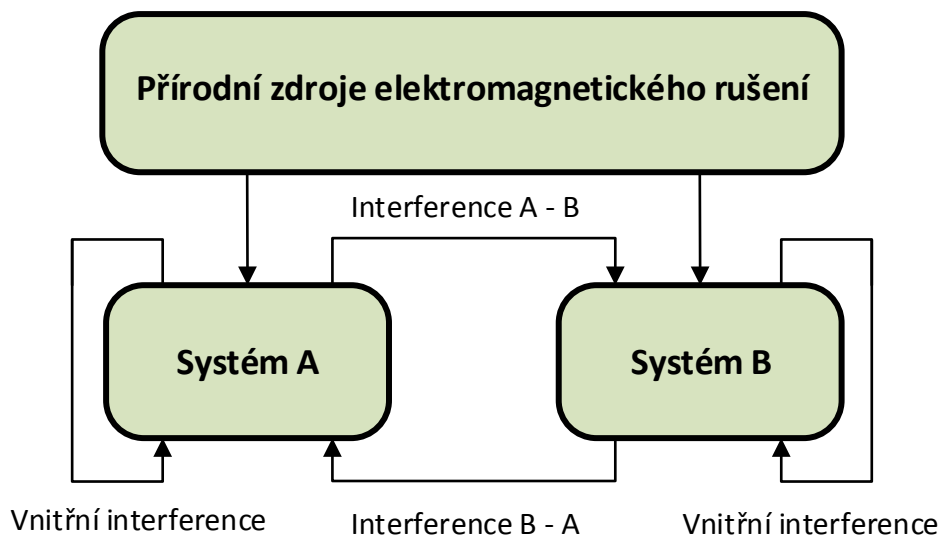
- ❖ Velmi dlouhé vlny (3 - 30 kHz) – šíří se po celém zemském povrchu (zeměkouli). S využitím pro celosvětové navigační soustavy, pro námořní a leteckou dopravu
- ❖ Dlouhé vlny (30 - 300 kHz) – s možností využití pro radiokomunikaci, meteorologii a rozhlas DV
- ❖ Střední vlny (0,3 - 3 MHz) – s možností využití pro radionavigaci, sdělovací služby a rozhlas SV
- ❖ Krátké vlny (3 - 30 MHz) – s možností využití pro radiokomunikaci na střední, velké vzdálenosti a rozhlasové vysílání
- ❖ Velmi krátké vlny (30 - 300 MHz) – s možností využití pro rozhlas VKV, televizi v I. II. a III. pásmu a také pro sdělovací služby omezeného dosahu, jako jsou sanitní služba, hasiči, policie, dopravní pohotovost, družicové spojení
- ❖ Ultra krátké vlny (0,3 - 3 GHz) – s možností využití pro televizi IV. a V. pásmo, radiokomunikace na krátkou vzdálenost, radioreleová a kosmické spoje, radiolokace a radionavigace

- ❖ Centimetrové vlny (3 – 30 GHz) – pro radioreléové spoje, protože se dají vysílat v úzkých svazcích v určeném směru. Užití ve vícenásobné telefonii, u radiolokátorů a pro spojení s družicemi
- ❖ Milimetrové vlny (30 – 300 GHz) – s možností využití pro přesné přistávací a říční lokátory, výškoměry, pro speciální radioreléové spoje a telekomunikaci na vláknových světlovodech

## 1.8 Elektromagnetická kompatibilita EMC - druhy civilních norem

Při vývoji a realizaci spektrálních analyzátorů je jedním z důležitých kritérií, aby jejich koncepce splňovala základní požadavky na elektromagnetickou kompatibilitu, to platí i v případě spektrálního analyzátoru ESPI 7.

Elektromagnetickou kompatibilitu můžeme definovat jako disciplínu, která se zabývá problematikou nežádoucího ovlivňování činností různých technických a biologických systémů účinky elektromagnetického pole. Jedná se zde o systémy, které mohou mít i nemusí vzájemnou funkční souvislost. Mezinárodně používaná zkratka EMC pochází z anglického Electromagnetic compatibility. Shodným pojmenováním je též označena i vlastnost, která charakterizuje schopnost současné správné činnosti jednotlivých systémů dané skupiny svázaných spolu prostřednictvím elektromagnetických vazeb (závislost na konstrukci zařízení), obr. 1.5.



Obr. 1.5: Strukturální vztahy elektrotechnických systémů z pohledu EMC

Interference (ovlivnění) konkrétního systému se může projevit v různých formách od zhoršení kvality až po havarijní stavy. Z pohledu rušení můžeme elektromagnetickou kompatibilitu rozdělit do následujících oblastí [3]:

- ❖ Zdroje rušivých signálů – řeší se zde obecné otázky mechanismů vzniku rušení (charakter, intenzita). Přírozeným zdrojem rušení může být výboje v ovzduší (elektromagnetické bouře) nebo elektromagnetická vlnění produkovaná kosmickými tělesy. Musí se vzít v úvahu i vnitřní zdroje rušení, kdy jako vysílací antény mohou sloužit všechny dlouhé přívody, dlouhé vodiče na deskách plošných spojů atd. Obsahují-li desky integrované obvody, pak proudové impulzy na desce vyzařují signály až do frekvenčního spektra řádově GHz.
- ❖ Cesty přenosu rušivých signálů – kde vazba mezi zdrojem signálu a přijímačem může být např. induktivní, kapacitní, galvanická, elektromagnetická či jejich kombinace.
- ❖ Přijímače rušivých signálů – zejména jde o určení jednotlivých typů, ve vazbě na přenosovou cestu a detailní specifikaci rušivých účinků. Digitalizace zařízení umožnila snížit citlivost na rušení.
- ❖ Snižování úrovně rušivých signálů – řeší se zaprvé z pohledu snižování úrovně rušivých signálů na cestě od zdroje k přijímači a za druhé snižování úrovně generovaných rušivých signálů v místě jejich vzniku. Odrušování zdrojů rušení se provádí vhodnou konstrukcí nebo vhodnými filtry.
- ❖ Zvyšování odolnosti zařízení proti rušivým signálům – se zvyšuje také spolehlivost elektronických zařízení. Tato oblast v sobě zahrnuje mimo jiné způsoby filtrace napájecích přívodů (přepět'ové ochrany vstupů), konstrukční a technologické uspořádání částí elektronických zařízení omezující vnitřní interferenci, zjišťování vlastností jednotlivých elektronických prvků z pohledu odolnosti vůči rušivým vlivům, zabývá se kvantitativním zjišťováním vybraných parametrů (reprezentující elektromagnetické pole) na třech základních článcích EMC (zdroj, cesta, přijímač).

Z pohledu platných norem, které řeší danou problematiku, se jedná hlavně o ČSN EN 50081 a ČSN EN 50082, jde o základní normy, které stanovují všeobecné požadavky EMC pro jakékoli elektrické spotřebiče a přístroje při provozu v určitém typu prostředí. Rozlišují se zde dva typy prostředí: obytná, obchodní, lehký průmysl a průmyslová.

První norma ČSN EN 50081 neboli všeobecná norma týkající se vyzařování se v 1. části vztahuje k prostorům obytným, obchodním, lehkého průmyslu charakterizovanými tím, že jsou napájena přímo z veřejné sítě nízkého napětí. Účelem této normy je určení mezních hodnot elektromagnetického vyzařování v kmitočtovém rozsahu 0 až 400 GHz a příslušných zkušebních metod. Mezní hodnoty vyzařování byly stanoveny tím způsobem, aby běžně generovaná rušení v prostorách specifikovaných normou nepřekročila úroveň narušující činnost jiných běžných elektrických a elektronických přístrojů. Jednotlivé mezní hodnoty a požadavky na zkoušení jsou normou specifikovány pro každý vstup zařízení, tj. pro každé rozhraní daného přístroje s vnějším elektromagnetickým prostředím. Tato všeobecná norma EMC se používá pouze v případech, kdy pro konkrétní zařízení neexistuje výrobová norma EMC nebo norma EMC pro skupinu výrobků. Netýká se však přístrojů a zařízení, které jsou určeny pro vysílání elektromagnetických vln pro radiokomunikační účely [3].

Druhá část normy ČSN EN 50081 definuje požadavky na rušivé emise elektrických či elektronických zařízení provozovaných v průmyslovém prostředí s následujícími třemi charakteristikami:

- ❖ přítomnost průmyslových, vědeckých nebo lékařských přístrojů
- ❖ časté spínání velkých indukčních nebo kapacitních zátěží
- ❖ přítomnost velkých proudů ve spojení s magnetickými poli velké intenzity

Tuto normu je možné použít pouze v situaci, když pro zařízení neexistují jednoúčelové normy výrobků (skupiny výrobků). Za situace, že zařízení nevyhovuje mezním hodnotám rušivých veličin, které jsou definovány normou ČSN EN 50081-2, musí být opatřeno sdělením o zákazu použitelnosti v prostorech obytných, obchodních a lehkého průmyslu [3].

Druhá norma ČSN EN 50082 v první její části stanovuje požadavky na elektromagnetickou odolnost pro zařízení, která pracují v obytných nebo obchodních prostorech. Normu lze použít pouze v případě, když pro toto zařízení neexistují jednoúčelové normy výrobků či skupiny výrobků. V případě, že tyto normy existují, tak mají přednost před touto všeobecnou normou ČSN EN 50082. Tato norma platí stejně jako předchozí v kmitočtovém pásmu 0 až 400 GHz (nevztahuje se na zařízení, která jsou určena pro vysílání elektromagnetických vln pro radiokomunikační účely).

Druhá část normy ČSN EN 50082 navazuje na část předchozí a stanovuje požadavky na elektromagnetickou odolnost zařízení, která jsou určena pro průmyslové prostředí (vnitřní i vnější). Tyto přístroje však nejsou určeny pro přímé připojení do veřejné sítě, ale do rozvodných sítí (napájení instalací ve výrobních závodech). V normě je také zahrnuto, že dominantní zdroje rušení v průmyslových prostorech je možné určitými opatřeními omezit tím způsobem, že se vytvoří

elektromagnetické prostředí, pro které lze aplikovat normu ČSN EN 50082-1 stejně tak, jako pro prostory obytné, obchodní, lehkého průmyslu [3].

## 2. Spektrální analyzátory

### 2.1 Základní popis a rozdělení

Analýzu signálu můžeme provádět jednak v časové oblasti, tedy v závislosti na čase  $x(t)$ , např. jeho měřením pomocí osciloskopu nebo ve frekvenční oblasti, kde je signál charakterizován jako funkce frekvence.

Pro zobrazení různých typů signálů ve frekvenční oblasti jsou používány spektrální analyzátory, kdy hovoříme o analýze tzv. frekvenčního spektra. Hlavním cílem u diskrétního spektra je zjistit velikost jeho složek u spojitého spektra průběh spektrální hustoty. Fourierovu transformaci potom použijeme pro vyjádření vzájemné souvislosti signálu a jeho spektra. Za předpokladu, že máme k dispozici posloupnost vzorků měřeného signálu, který byl získán ekvidistantním vzorkováním se vzorkovacím intervalem  $T_s$ , je pro výpočet spektra použita tzv. diskrétní Fourierova transformace (DFT). Výsledkem je v tomto případě posloupnost hodnot diskrétního frekvenčního spektra, které jsou vzdáleny od sebe

$$\Delta f = 1/(NT_s), \quad (2.1)$$

kde  $N$  vyjadřuje počet bodů DFT a  $NT_s$  určuje celkovou dobu měření [4].

Obecně je možné současné spektrální analyzátory rozdělit do dvou skupin:

- ❖ Spektrální analyzátory „přeladované“ používající číslicové filtry (analogový vstup/digitální zpracování). Do této skupiny spadají i EMI přijímače, které můžeme dále členit na předcertifikační (nesplňují všechny požadavky norem CISPR), kam můžeme zařadit také analyzátor ESPI 7 a certifikační (splňují všechny požadavky norem CISPR).
- ❖ Spektrální analyzátory pracující v reálném čase (analogový vstup/digitální zpracování), příjem signálu v čase s omezenou šířkou pásma s transformací do kmitočtové oblasti, využívající výpočtu DFT, kdy hovoříme o tzv. FFT analyzátorech.



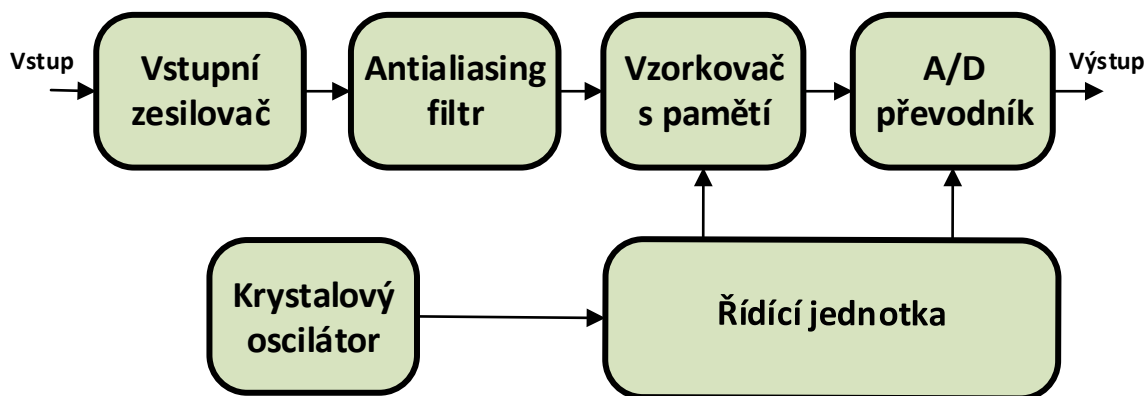
## 2.2 Základní parametry

- ❖ Frekvenční rozsah, který závisí na typu analyzátoru, který se u FFT analyzátorů pohybuje v rozsahu  $0 \div 100$  kHz.
- ❖ Frekvenční rozlišitelnost, která určuje nejmenší rozdíl frekvencí, který je analyzátor schopen rozlišit. V případě číslicových analyzátorů pro výpočet  $\Delta f$  použijeme již uvedený vztah (2.1).
- ❖ Frekvenční stupnice, která může být lineární či logaritmická.
- ❖ Dynamický rozsah, který je určen poměrem úrovně maximálního měřeného signálu  $U_{max}$  a šumovým prahem analyzátoru (bez přítomnosti měřeného signálu)  $U_{min}$ , výpočet můžeme provést dle vztahu (2.2), vyjadřuje se obvykle v jednotkách  $dB$  [4]

$$DR = 20 \log \frac{U_{max}}{U_{min}}. \quad (2.2)$$

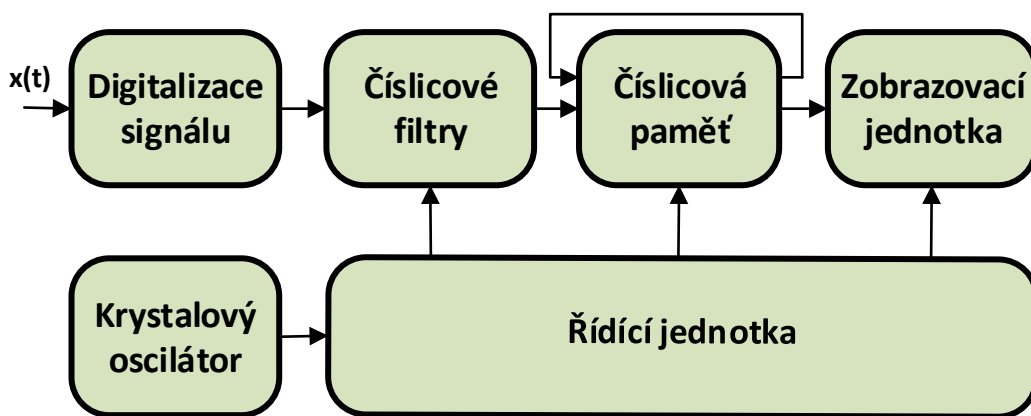
## 2.3 Číslicové spektrální analyzátory

Číslicové spektrální analyzátory pro svou činnost využívají metod číslicového zpracování signálu, kdy je analyzovaný signál nutné nejprve převést na digitální. Tento proces je nazýván digitalizace a je reprezentován bloky vstupního zesilovače (zesílení či zeslabení signálu na požadovanou úroveň), antialiasingového filtru (odstranění veškerých frekvenčních složek o kmitočtu větším než je polovina vzorkovací frekvence, analogová dolní propust), vzorkovače s pamětí a A/D převodníkem (proces digitalizace), na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Převod vstupního signálu na digitální (digitalizace)

Dále následuje zpracování digitalizovaného signálu, které je různé dle typu spektrálního analyzátoru. Jak již bylo uvedeno, existují dle principu činnosti dvě skupiny těchto analyzátorů. Jedná se o analyzátory používající číslicové filtry a o analyzátory pracující v reálném čase, které využívají pro svoji činnost diskretní Fourierovy transformace (DFT).

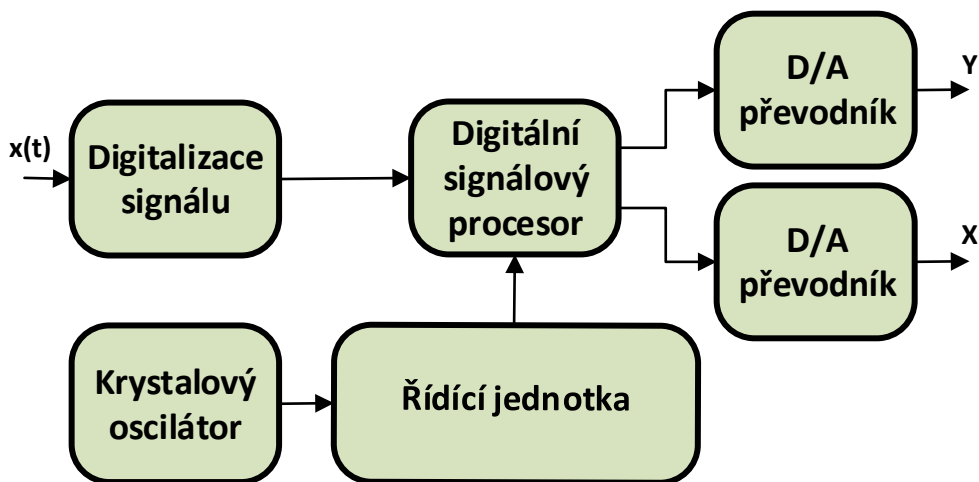


Obr. 2.2: Analyzátor pracující na bázi číslicové filtrace

U analyzátorů s číslicovými filtry na obr. 2.2, je digitalizovaný signál pomocí těchto filtrů převeden na číselnou posloupnost. Číslicové filtry jsou složeny z pásmové propusti, dolní propusti, vyrovnávací paměti a ze dvou multiplexerů, které se nachází na vstupech obou filtrů. Oktávová pásmová propust je ve většině případů dále rozdělena na tři třetinooktávové filtry, což je realizováno jediným obvodem s postupně proměnnými koeficienty. Výstupní zobrazení je tvořeno svislými sloupci, které odpovídají jednotlivým spektrálním složkám. Podstatnou výhodou těchto filtrů je, že koeficienty je možné měnit v průběhu procesu číslicové filtrace. Proto jeden hardwarový filtr může být využit jako několik filtrů, v případě, že jeho výstupní signál je ukládán v paměti a zpět přiveden na vstup filtru. Vlastnosti filtru je možné ovlivňovat změnou vzorkovací frekvence nebo změnou číselných koeficientů. Tento typ analyzátorů nachází využití v oblasti akustického pásma [4].

Analyzátory pracující v reálném čase na obr. 2.3, tzv. analyzátory FFT počítají diskretní Fourierovu transformaci (DFT) posloupnosti vstupních vzorků. V případě většího počtu vzorků by přímý výpočet podle základního vztahu pro DFT trval příliš dlouho, z toho důvodu se počítá za pomoci speciálních algoritmů. Využívá se zde rychlé Fourierovy transformace, která výpočet urychluje několikanásobně. Obvykle je označována zkratkou FFT (Fast Fourier Transform), pro její výpočet se

používají mikroprocesory používané v běžných počítačích. Výpočet musí být proveden velmi rychle, protože se jedná o analyzátory pracující v reálném čase, změny vstupního signálu se tedy ihned projeví v průběhu spektra. Z toho důvodu se dnes používají rychlé digitální signálové procesory, označované zkratkou DSP, kdy jedna instrukce trvá několik nanosekund a všechny provedené instrukce, trvají stejný čas. DSP může také obsahovat zvláštní zásuvná karta do počítače. Existují i speciální obvody, které jsou určeny výhradně pro rychlý výpočet FFT. Tyto analyzátory poskytují mimo amplitudového spektra i fázové spektrum signálu. Většinou mají kromě základního zobrazovacího režimu také režim frekvenční lupy, umožňující zobrazení detailu spektra na celou obrazovku. Jejich softwarové vybavení nabízí pro usnadnění měření další doplňkové funkce (např. zobrazení kurzorů pro obě osy) [4].



Obr. 2.3: Analyzátor pracující na bázi diskrétní Fourierovy transformace

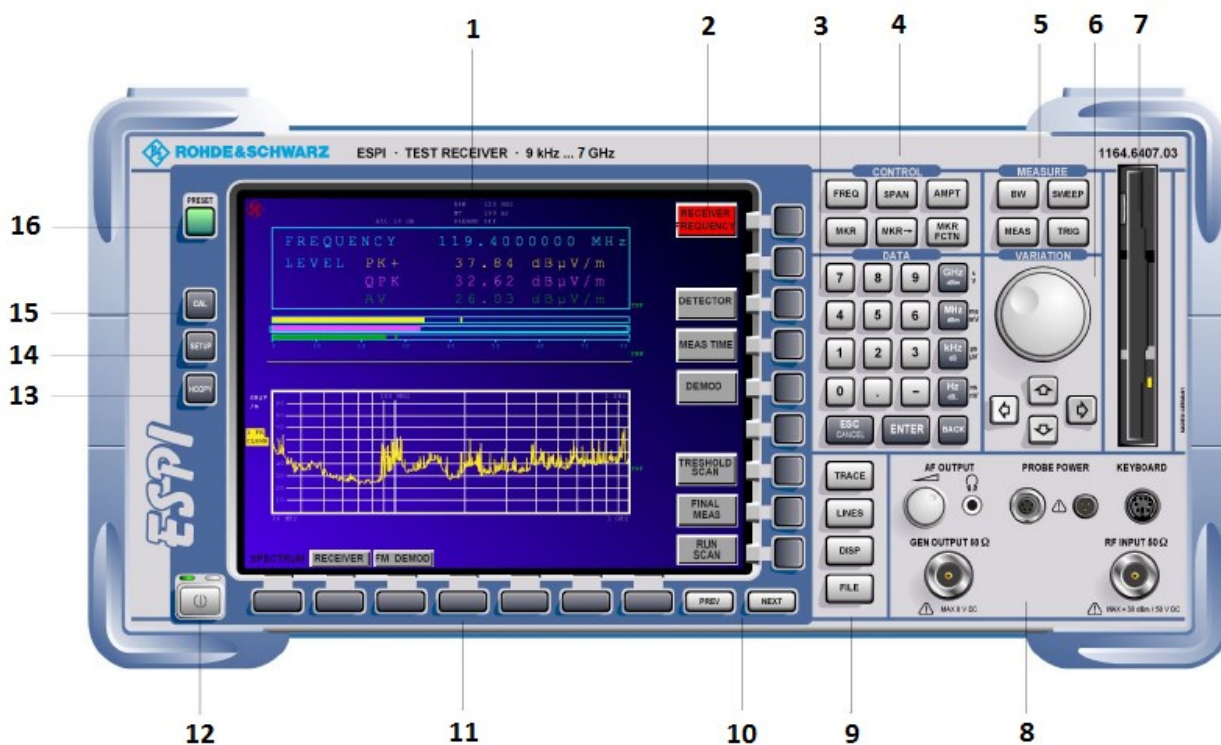
FFT analyzátory jsou vybaveny obvykle dvěma identickými vstupními kanály, kdy neměří pouze frekvenční spektrum, ale měří a zobrazují i jiné speciální funkce jako je např. autokorelační funkce, výkonová spektrální hustota aj. Je možné na nich zobrazit také časový průběh signálu. Tento typ přístrojů nazýváme analyzátory signálu. Data z měření je možné ukládat a zpracovávat na počítači. Standardizované přístrojové rozhraní umožňuje zapojení analyzátoru do měřicího systému a přenos dat do počítače.

## 2.4 Spektrální analyzátor ESPI 7

Měřicí zařízení ESPI nabízí výhody spektrálního analyzátoru, které daleko převyšují schopnosti a funkce konvenčních testovacích zařízení. Stanovuje důležitá kritéria, jako jsou funkčnost, rychlost měření a přesnost. V průběhu jeho vývoje je koncipován zvláště tak, aby splňoval všechny požadavky EMC testování. Modely ESPI se vyznačují vynikajícím dynamickým rozsahem a mohou podávat přesná EMI měření v souladu s CISPR 16-1-1 pro signály s frekvencemi opakovaného pulzu od 10 Hz.

Pro bezproblémovou realizaci měření je nezbytné si předem projít základní funkce přístroje, kdy jejich nastavení se provádí na hlavním ovládacím panelu, dále je důležité se seznámit s jednotlivými vstupními a výstupními konektory.

Přední panel analyzátoru ESPI 7 je znázorněn na obr. 2.1, kdy jednotlivé funkční celky jsou označeny čísly [5].



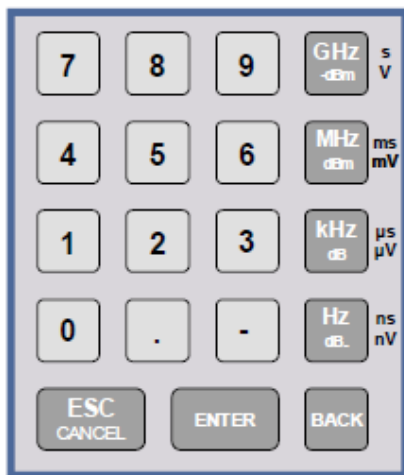
Obr. 2.1: Analyzátor ESPI 7 – přední panel [5]

Více než polovinu levé přední části přístroje zabírá barevná obrazovka na obr. 2.1 označeno č. 1. Zobrazuje informace o výsledcích a průběhu měření podle zvolené měřicí metody, kdy je možné

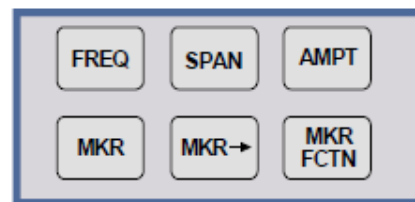
použít dva režimy zobrazení. V prvním režimu tzv. rozdělené obrazovky (Split Screen mode), je obrazovka rozdělena na dvě části. Horní polovina ukazuje číselné hodnoty úrovně signálu, frekvence. Dolní polovina ukazuje grafické znázornění spektra signálu. V druhém režimu tzv. úplné obrazovky je možné se přepínat pomocí horkých tlačítek mezi obrazovkami A nebo B (Full Screen mode).

V pravé části obrazovky je zobrazen popis devíti programovatelných tlačítek na obr. 2.1 označeno č. 2, kdy jejich definované funkce nejsou závislé na typu prováděného měření (Softkey).

Blok tlačítek pro zadávání vstupních číselných hodnot s možností zvolit vhodnou jednotku je označen na obr. 2.1 č. 3, detail ukazuje obr. 2.2.



Obr. 2.2: Tlačítka pro zadávání vstupních číselných hodnot



Obr. 2.3: Skupina tlačítek č. 4

Níže je uveden detailně popis funkcí tlačítek jednotlivých sekcí od čísla 4 na obr. 2.3:

FREQ – nastavení frekvenční osy

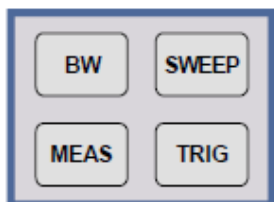
SPAN – nastavení frekvenčního rozsahu

AMPT – nastavení úrovně a konfigurace vstupu RF

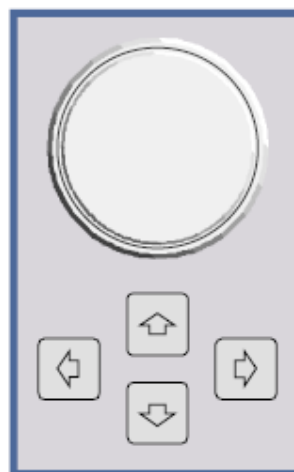
MKR – nastavení funkce standardní a delta značek

MKR → – změna nástroje pro nastavení pomocí značek

MKR/FCTN – volba dalších funkcí pro standardní a delta značky



Obr. 2.4: Skupina tlačítek č. 5



Obr. 2.5: Skupina tlačítek a ovladače č. 6

BW – šířka kmitočtového pásma, video pásma, časové základny, vazby na tyto parametry

SWEEP – volba základny, nastavení zobrazení parametrů

MEAS – výběr a nastavení měřeného výkonu nebo volba snímače a doby měření

TRIG – nastavení spínání zdrojů

Klávesy pro pohyb kurzoru s vazbou na velikost signálu na vstupu (definuje také směr pohybu pro otočný ovladač) a otočný ovladač kurzoru znázorňuje obr. 2.5. Otočný ovladač je mimo ovládání kurzoru také využit k nastavení vstupních hodnot, k umístění značek a mezí. Další možné použití je k výběru písmen v řádkovém editoru nápovědy a ukončení vkládání dat.

Disketová mechanika 3 ½"; 1,44 MB (označena č. 7, na obr. 2.1) je zde jako jednou s možností pro uložení naměřených dat, druhá možnost je ukládat data přes LAN síť na pevný disk počítače s využitím integrované síťové karty. Bude rozebráno a popsáno detailně v následujících kapitolách.

Konektor pro vstupní signál s označením RF INPUT, konektor s výstupním signálem z generátoru s označením GEN OUTPUT, konektor pro externí klávesnici, konektor pro možnost napájení příslušenství a regulovatelný sluchátkový výstup, toto vše znázorňuje na obr. 2.1 skupina tlačítek s označením č. 8.

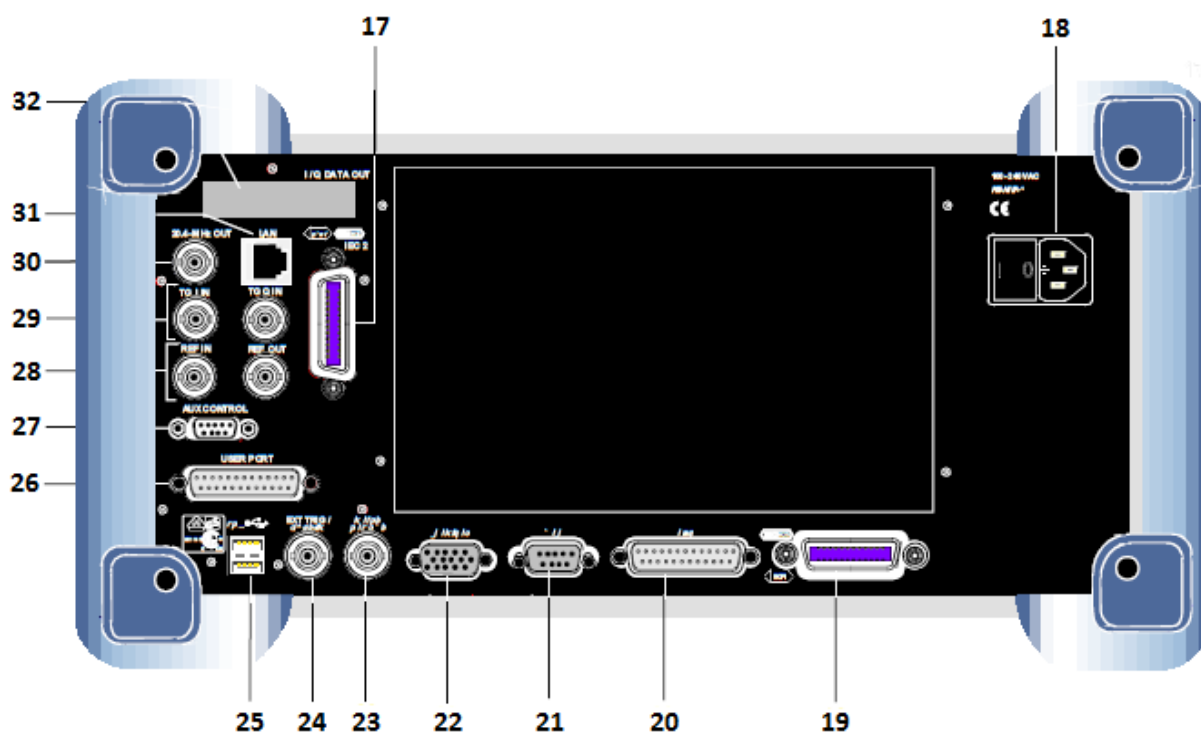


TRACE – výběr a aktivace stop a snímačů  
 LINES – vymezení čar  
 DISP – konfigurace display  
 FILE – uložení a načtení dat měřicího přístroje,  
 konfigurace prostředků paměti a dat

Obr. 2.6: Skupina tlačítek č. 9

Skupina č. 10 obsahuje tlačítka NEXT a PREV, která slouží ke změně podružného menu a volání hlavního menu. Skupina horkých kláves je označena na obr. 2.1 č. 11.

Zapnutí přístroje, konfigurace a start tiskové úlohy, globální nastavení, záznam upravených dat, volba výchozího nastavení, je obsaženo v popisu pod označením čísla 11 až 16, na obr. 2.1 [5].



Obr. 2.7: Analyzátor ESPI 7 – zadní panel [5]

Popis jednotlivých konektorů zadního panelu analyzátoru ESPI 7 s označením dle obr 2.7 [5]:

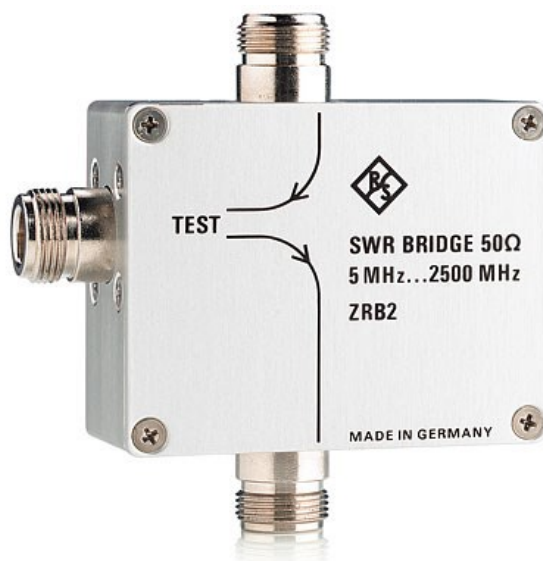
- 17 – IEC/IEEE druhý sběrníkový konektor pro externí generátor (pouze typ R&S FSP-B10)
- 18 – konektor síťového napájení
- 19 – IEC/IEEE sběrníkový konektor
- 20 – paralelní port (konektor pro připojení tiskárny)
- 21 – sériový port (COM)
- 22 – konektor VGA pro externí monitor
- 23 – výstupní konektor pro externí zvukový zdroj
- 24 – vstupní konektor pro externí klopný obvod nebo zdroj signálu
- 25 – dva USB porty
- 26 – USER PORT uživatelský port pro použití TTL logiky
- 27 – pomocné rozhraní (synchronizace pomocí TTL rozhraní)
- 28 – REF IN, REF OUT vstup externího a výstup interního referenčního zdroje signálu 10 MHz
- 29 – vstupní konektor pro externí modulaci z kontrolního generátoru
- 30 – výstupní konektor pro 20,4 MHz a volitelný CCVS vstupní/výstupní konektor
- 31 – LAN konektor (RJ-45)
- 32 – rezervovaný pro zvláštní příslušenství

### **3. Příslušenství použité k měření**

#### **3.1 SWR můstek ZRB 2**

SWR můstek ZRB 2 na obr. 3.1 se používá pro měření energie, která je odražena od zátěže (např. antény). Jedná se o měření koeficientu odrazu, konkrétně jeho velikosti a fáze. Část signálu je odražena přes SWR můstek na ukazatel a hodnota závisí na výši koeficientu odrazu měřeného zařízení. S použitím moderních měřidel je možné převést naměřené hodnoty na další parametry, kterými mohou být impedance, popř. admitance, zobrazit jejich velikost i fázi jako reálné a imaginární hodnoty.





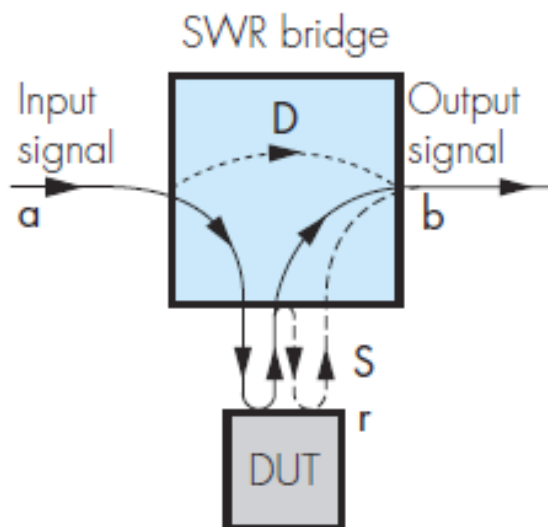
Obr. 3.1: SWR můstek ZRB 2 [6]

Můstek je zapojen v napájecím vedení mezi zdrojem signálu a měřeným zařízením. Je opatřen třemi N konektory se závity. První vstupní (nahore) je určen pro zapojení kabelu s výstupním signálem z generátoru, druhý výstupní (dole) pro kabel se signálem směřujícím k měřicímu zařízení a třetí s označením TEST, slouží k připojení měřeného zařízení (např. antény). V našem případě bude jako měřicí zařízení a zdroj signálu (generátor) použit spektrální analyzátor ESPI 7.

Díky nevyhnutelným mechanickým a elektrickým tolerancím použitých součástí není možné vyrobit můstek, který bude mít zcela ideální charakteristiky v daném kmitočtovém rozsahu [6].

### 3.1.1 Vlastnosti můstku ZRB 2 ve vazbě na měřený signál

Bez ohledu na užitečný signál  $a$ , jehož cesta je znázorněna plnou čarou na obr. 3.2, je pouze malá část  $D$  přenesena přímo na výstup  $b$ . Tento signál má v podstatě charakter přeslechu a je důsledkem určité směrovosti můstku. Určitá chyba je též způsobena vstupním součinitelem odrazu  $S$  spojky na můstku, protože měřený signál je opět „zrcadlen“ zpět konektorem můstku. Tento signál se znovu částečně odráží a na konec dosahuje výstupní úrovně můstku, zobrazeno čárkovaně.



Obr. 3.2: Průběh signálu na SWR můstku ZRB 2 [6]

Jestliže na můstku zanedbáme vícenásobné odrazy, může být odvozen následující vztah mezi výstupním signálem  $b$  a vstupním signálem  $a$  můstku [6].

$$b = T \times (D + r + S \times r^2) \times a \quad (3.1)$$

$T$  – vložené ztráty

$D$  – směrovost můstku

$r$  – koeficient odrazu

$S$  – součinitel odrazu na TEST rozhraní

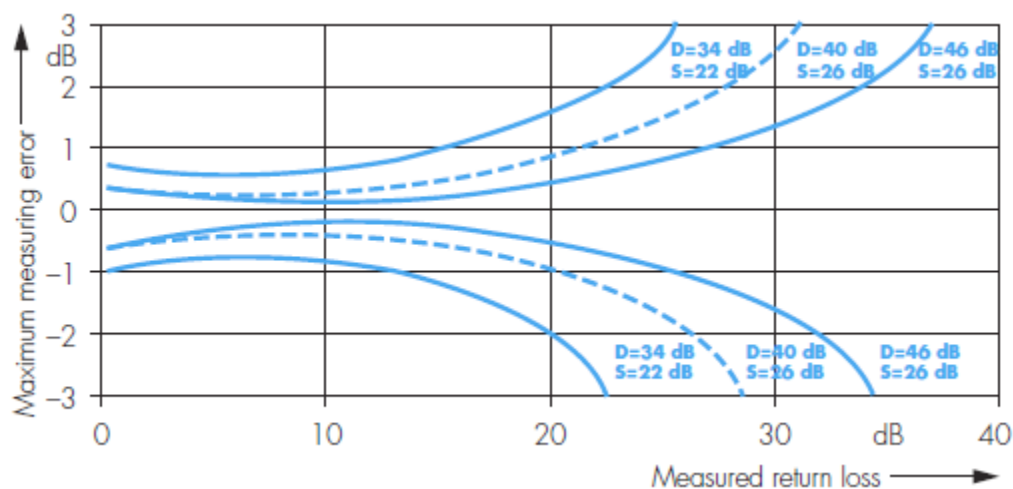
$a$  – vstupní signál

Z rovnice (3.1) je zřejmé, že měření koeficientů malých odrazů mohou být negativně ovlivněna konečnou směrovostí můstku. Relativní chyba měření se zvyšuje s klesajícím koeficientem odrazu. Koeficienty odrazu, které jsou menší, než je směrovost můstku, nemohou být měřeny přímo.

Při měření velkých koeficientů odrazů chyba vzniklá konečnou směrovostí můstku může být zanedbána. Přesnost měření je nyní určena nesouladem na konektoru testovaného zařízení. Se směrovostí 40 dB a koeficientem odrazu portu testovaného zařízení 23 dB bude maximální absolutní chyba s ohledem na koeficient odrazu, který je měřen  $0,01 + 0,07 |r^2|$  [6].

### 3.1.2 Maximální chyba měření

Obr. 3.3 znázorňuje maximální chybu měření, která je očekávána s ohledem na měřené zpětné ztráty a dovoluje kvantitativní určení tohoto vztahu. Zakreslené křivky reprezentují nejvyšší možné kladné a záporné odchylky měřené hodnoty od skutečné hodnoty zpětné ztráty. Je třeba poznamenat, že tyto hodnoty reprezentují určené limitní hodnoty můstku. Pro nižší a střední frekvenční rozsahy, jak párování konektoru testovaného zařízení, tak i směrovost jsou vyšší, než je stanoveno. Jakákoliv nejistota měření, která se pak objeví, je nižší, než zakreslené limity a může být ve většině případů v praktických měřeních zanedbána [6].



Obr. 3.3: Maximální chyba měření s ohledem na měřené zpětné ztráty [6]

### 3.1.3 Technické parametry můstku

Výčet základních parametrů SWR můstku ZRB 2 je obsažen v tab. 3.1. Je zde důležité uvést, že tento typ můstku má frekvenční rozsah pouze do 2500 MHz. Díky tomuto omezení není možné provádět měření parametrů vedení antén v pásmu 5 GHz [6].

Charakteristická impedance [ $\Omega$ ]	50
Frekvenční rozsah [MHz]	5 -2500
Směrovost [dB]	$\geq 40$
Zpětné ztráty na TEST rozhraní [dB]	$\geq 23$
Chyba měření	$0,01 + 0,07  r^2 $
Celkové vložné ztráty (5 MHz) [dB]	13
Operativní spotřeba [W]	0,5

Tab. 3.1: Parametry SWR můstku ZRB 2 [6]

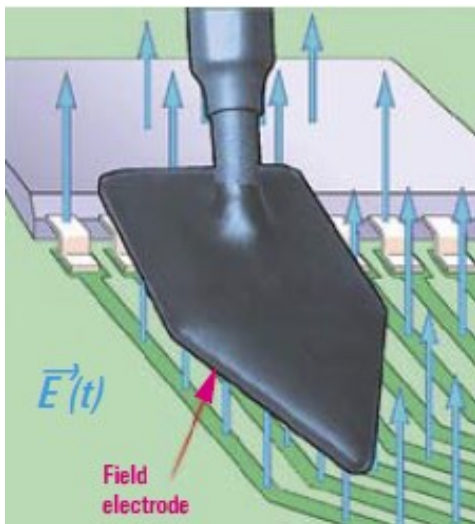
## 3.2 Sada měřících sond pro měření blízkého pole veličin E a H

### 3.2.1 Základní charakteristika

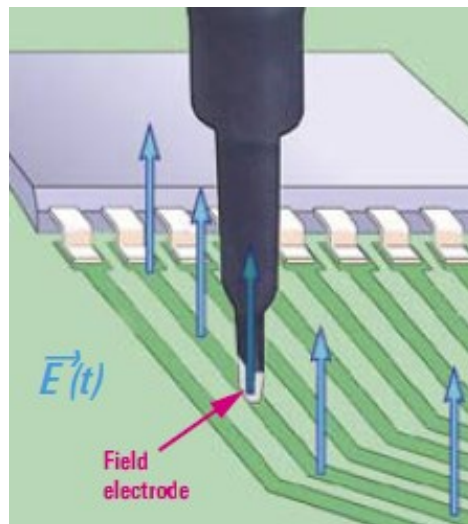
Sada měřících sond s označením HZ-15 výrobce Rohde & Schwarz se používá k měření elektrické a magnetické složky elektromagnetického pole. Sada obsahuje celkem pět sond, z nichž jsou dvě určeny pro měření elektrického blízkého pole  $E$  a tři pro měření magnetického blízkého pole  $H$ . Kabel, ke kterému jsou měřící sondy připojeny je zakončen BNC konektorem. Pro připojení sond na vstup RF INPUT analyzátoru ESPI 7 je tedy nutné použít redukci z konektoru typu BNC na typ N ( $50 \Omega$ ) [7].

Na obr. 3.4 je zobrazena první sonda s označením RS E 02, která se používá pro měření elektrického pole. Měřicí plocha sondy je větších rozměrů, má tvar žehličky a přikládá se do těsné blízkosti oblasti, kterou měříme s rozměry přibližně  $2 \times 5$  cm.

Naopak sonda RS E 10 na obr. 3.5 se přiloží přímo do místa (k jednomu vodiči), které měříme, kde šířka oblasti měření je 0,2 mm. Jedná tedy o měření velmi úzkého svazku elektrického pole  $E$ .

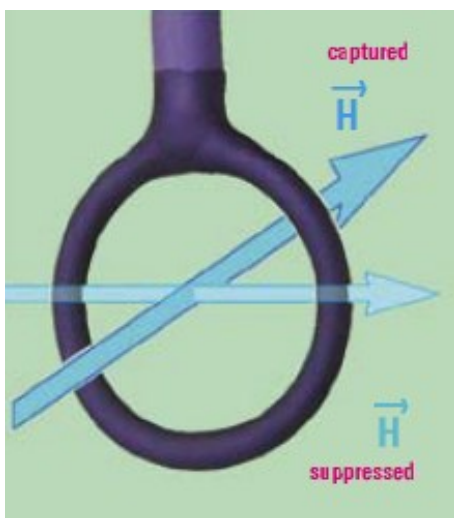


Obr. 3.4: Sonda RS E 02 [7]

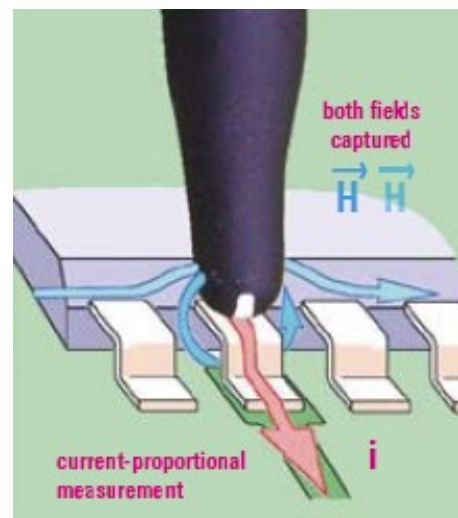


Obr. 3.5: Sonda RS E 10 [7]

Nyní se dostáváme k sondám, které slouží pro měření složky magnetického pole  $H$ . Měřicí sonda RS H 400-1 na obr. 3.6 má tvar prstence s velkým průměrem 25 mm. Díky tomu umožňuje provádět měření s velkou citlivostí, kde výsledek je vlastně průměrnou hodnotou složky  $H$  v celé oblasti oka sondy. Další sonda v pořadí na obr. 3.7 nese označení RS H 50-1, která je provedením shodná jako předchozí, pouze průměr oka je zde 10 mm. Díky menší velikosti oka je její měřicí přesnost vyšší, citlivost při měření bude však nižší. Hlavní úlohu pro přesné výsledky měření bude v tomto případě hrát přesné natočení sondy ke směru pole [7].



Obr. 3.6: Sonda RS H 400-1 [7]



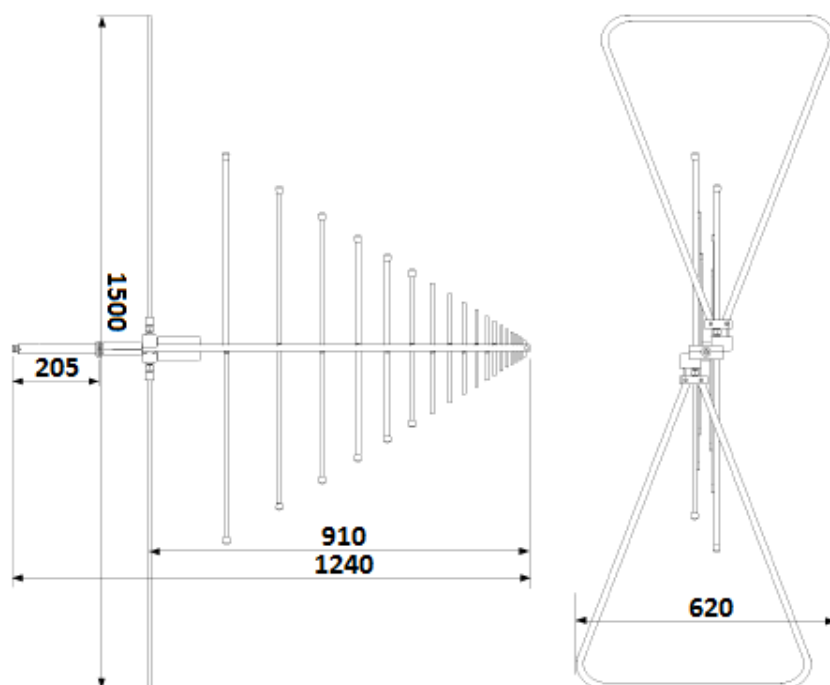
Obr. 3.7: Sonda RS H 50-1 [7]

Poslední uvedená sonda s označením RS H 50-1 se používá pro měření magnetického pole  $H$ , kde oblast měření má šířku 0,5 mm. Přikládá se přímo na místo (k jednomu vodiči), kde provádíme měření (např. u kondenzátorů). Slouží tedy pro měření velmi úzkého spektra složky  $H$  elektromagnetického pole.

### 3.3 Antény

#### 3.3.1 Širokopásmová anténa VULB 9163

Jedná se o lineárně polarizovanou (logaritmicko-periodickou) širokopásmovou anténu s dipólem, která je určena pro provoz v pásmu 30 MHz až 3 GHz (mezní hodnoty použití 25 MHz až 4 GHz). Celkové rozměry antény jsou  $1500 \times 1240 \times 620$  mm, na obr. 3.8. Je určena pro nominální impedanci  $50 \Omega$ . Úhel vyzařování signálu ve vertikální rovině je  $45^\circ$  až  $65^\circ$  a v horizontální rovině  $90^\circ$  až  $120^\circ$ , kdy tyto hodnoty jsou stanoveny pro frekvenční pásmo  $f > 150$  MHz. Maximální trvalý vstupní výkon je 100 W. Konektor pro připojení kabelu je typu N-female [8].



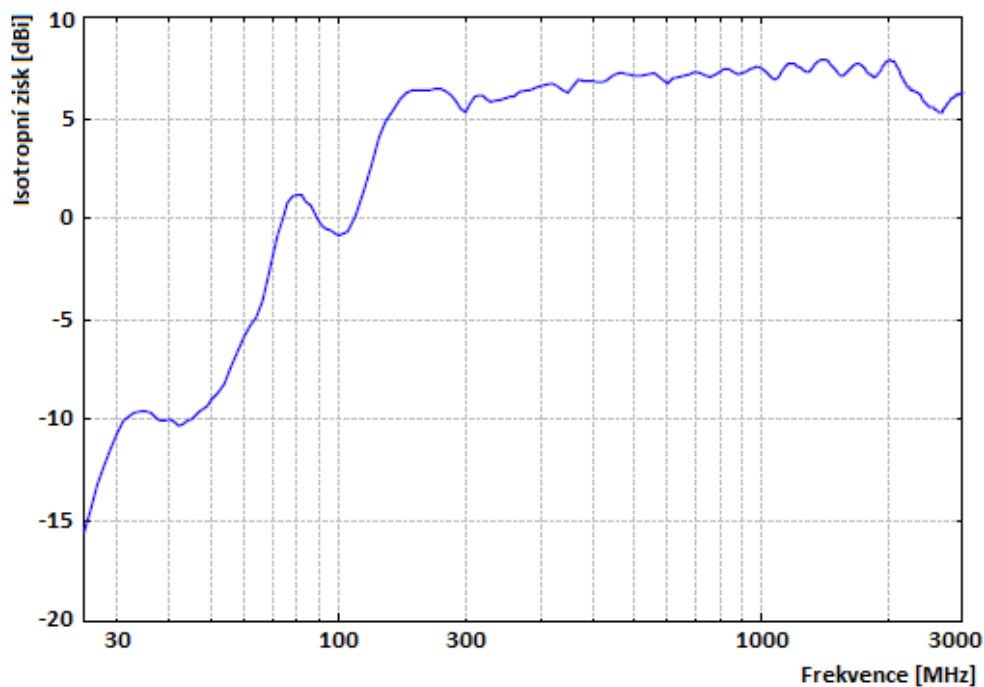
Obr. 3.8: Anténa VULB 9163 [8]

V tab. 3.2 jsou uvedeny výrobcem naměřené hodnoty základních parametrů této antény pro Wi-Fi pásmo 2,4 GHz, ve kterém bude realizováno i praktické měření v rámci navržených laboratorních úloh.

Frekvence [MHz]	Délka [m]	Vlnová délka [m]	Útlum [dB]	Zisk (isotr.) [dBi]	Ant. faktor [dB/m]
2400,00	3,20	0,13	38,13	6,00	31,82
2420,00	3,20	0,12	38,37	5,92	31,98
2440,00	3,20	0,12	38,57	5,86	32,11
2460,00	3,19	0,12	38,98	5,69	32,35
2480,00	3,19	0,12	39,16	5,63	32,48

Tab. 3.2: Základní parametry uváděné výrobcem pro Wi-Fi pásmo 2,40 až 2,48 GHz [8]

Na obr. 3.9 je pro názornost graficky zobrazena velikost zisku antény v závislosti na zvyšující se frekvenci. Je tedy zřejmé, že velikost zisku antény zůstává prakticky od 200 MHz do 2,5 GHz konstantní nad hodnotou 5,5 dBi [8].



Obr. 3.9: Průběh isotropního zisku antény VULB 9163 v závislosti na frekvenci [8]

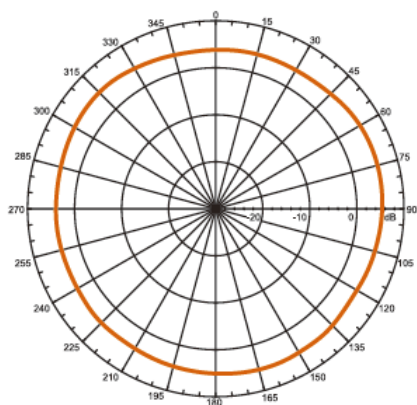
### 3.3.2 Všesměrová anténa TP-LINK TL-ANT2405C

Jedná se o všesměrovou anténu pro použití uvnitř budov se ziskem 5 dBi pracující v pásmu 2,4 GHz, obr. 3.10. Anténa má napevno připevněný koaxiální kabel RG-174 s délkou 1,3 m [9].

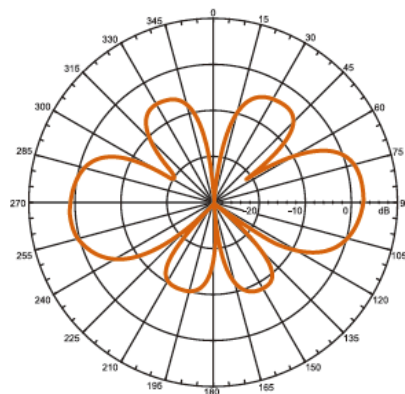


Obr. 3.10: Anténa TP-LINK TL-ANT2405C [9]

Vyzařovací charakteristiky ve vertikálním a horizontálním směru dané výrobcem jsou znázorněny na obrázcích obr. 3.11 a obr. 3.12. V horizontální rovině je to 360° a ve vertikální 32°.



Obr. 3.11: H-vyzařovací charakteristika [9]



Obr. 3.12: V-vyzařovací charakteristika [9]



Nejdůležitější parametry této antény jsou uvedeny v tab. 3.3.

Frekvenční rozsah	2,4 GHz ~ 2,5 GHz
Impedance	50 $\Omega$
Zisk	5 dBi
Vyzařovací úhel	Horizontálně 360°, vertikálně 32°
Polarizace	Lineární, vertikální
Provozní teplota	-20°C ~ 65°C
Konektor	RP-SMA Female

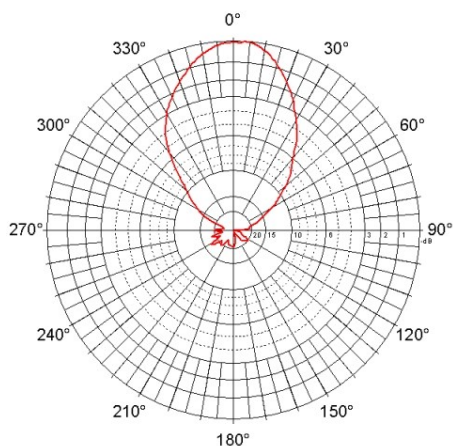
Tab. 3.3: Základní parametry antény TP-LINK TL-ANT2405C [9]

### 3.3.3 Panelová anténa JPA-9 P

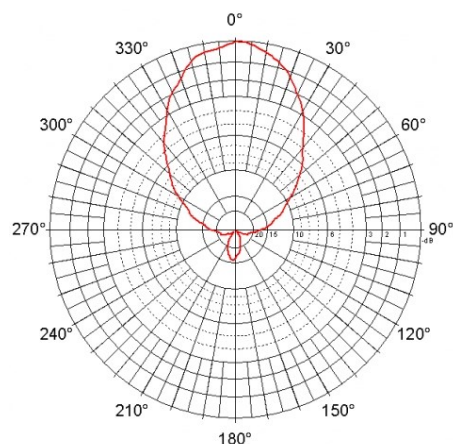
Jedná se o panelovou anténu pro vnitřní i venkovní použití se ziskem 9 dBi pracující v pásmu 2,4 GHz, obr. 3.13. Anténa má napevno připevněný koaxiální kabel s délkou 3 m. Vyzařovací charakteristika je v obou rovinách 65°, obr. 3.14 a obr. 3.15. Nejdůležitější parametry této antény jsou potom uvedeny v tab. 3.4.



Obr. 3.13: Panelová anténa JPA-9 P [10]



Obr. 3.14: H-vyzařovací charakteristika [10]



Obr. 3.15: V-vyzařovací charakteristika [10]

Frekvenční rozsah	2,4 GHz - 2,485 GHz
Impedance	50 $\Omega$
Zisk	9 dBi $\pm$ 0,5
Vyzařovací úhel	65° v obou rovinách
Polarizace	Vertikální, horizontální
Konektor	RP-SMA Female

Tab. 3.4: Základní parametry antény JPA-9 P [10]

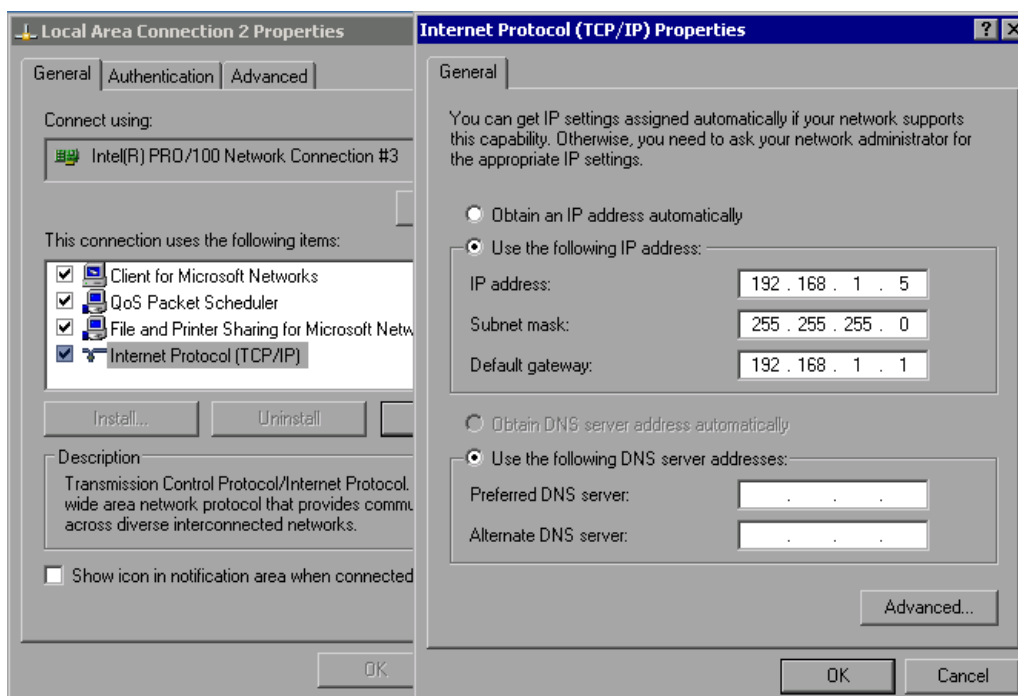
## 4 Realizace vzdálené komunikace s analyzátozem ESPI 7 v LAN síti

### 4.1 Základní konfigurace analyzátoru ESPI 7

Analyzátor si můžeme představit jako „minipočítač“, kde jeho základ tvoří mikroprocesor, operační paměť, pevný disk, několik typů komunikačních rozhraní, obrazovka a měřicí elektronika. Na pevném disku je nainstalován operační systém Windows XP Embedded, na kterém je provozována vlastní aplikace analyzátoru. Díky instalovanému operačnímu systému je možné jednoduše provádět nastavení konfigurace sítě, uživatelů, periférií aj. stejným způsobem, jako na běžném počítači.

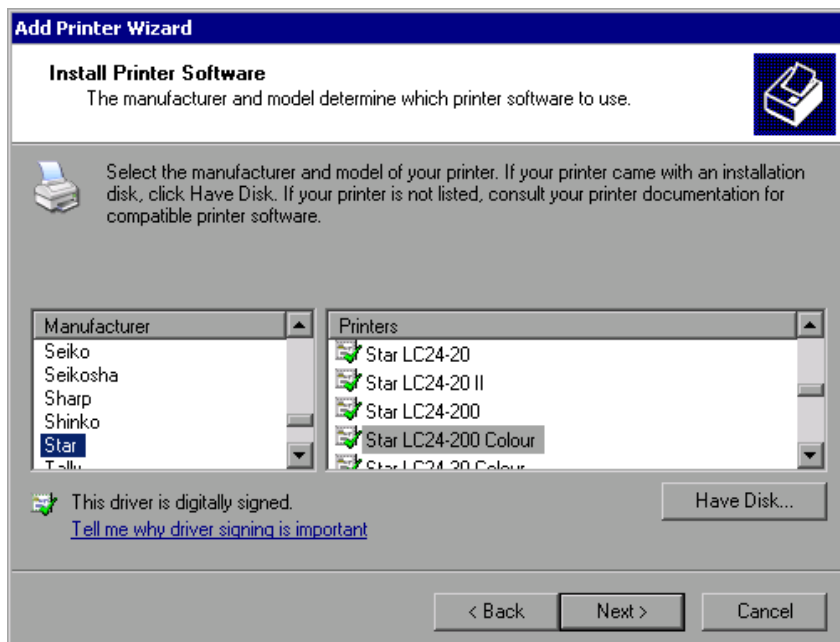
Pro zdárnou realizaci síťové komunikace bylo nutné v operačním systému analyzátoru provést konfiguraci síťového připojení (síťového adaptéru), jednalo se o nastavení IP adresy, masky, případně

brány. Jelikož předpokládám, že i v budoucnu bude s analyzátozem komunikovat jeden počítač či notebook, kde budou nainstalovány potřebné ovladače, knihovny, aplikace, nastavil jsem statické hodnoty, bez použití služby DHCP. IP adresu analyzátoru jsem nastavil 192.168.1.5, masku 255.255.255.0, bránu 192.168.1.1. IP adresa síťové karty notebooku (připojení UTP kabelem), na kterém jsem komunikaci realizoval, jsem zvolil 192.168.1.2, obr. 4.1.



Obr. 4.1: Nastavení IP konfigurace síťového adaptéru

Ještě bych se chtěl zde zmínit o perifériích. K analyzátoru je možné připojit různé druhy periférií podle zvoleného typu komunikačních rozhraní. Může se jednat se o externí monitor, USB periférie (myš, klávesnice, paměťové médium), zařízení komunikující přes COM port a také všechny druhy tiskáren, které Windows XP podporují. Jejich instalace se provede běžným způsobem jako u počítače či notebooku s operačním systémem Windows XP, obr. 4.2.



Obr. 4.2: Instalace vybrané tiskárny

## 4.2 Vzdálené ovládání a komunikace se spektrálním analyzátozem ESPI 7

### 4.2.1 Úvod

Data, získaná při různých typech měření prováděných s analyzátozem ESPI 7 jsou nyní složitě kopírovány na diskety, či USB paměťová zařízení a z nich dále ukládány na pevný disk počítače či notebooku. Tento proces je však velmi pracný a zdlouhavý, navíc z důvodu specifického typu datových souborů postrádá možnost jejich bezproblémového načtení současnými grafickými či analytickými programy. Aplikace vlastního analyzátoru je provozována na operačním systému Windows XP Embedded, kdy na něm není zprovozněn žádný odpovídající software, který by umožnil jednoduchou a rychlou práci s naměřenými daty.

Nejprve jsem zvažoval, že se pokusím vytvořit ovladač pro komunikaci s analyzátozem, který by naměřená data vždy automaticky uložil přes LAN síť na pevný disk počítače či notebooku. Dospěl jsem však k závěru, že by to nejspíše nesplňovalo požadavek určitého komfortu, tedy mít při měření rychle k dispozici standardizovaný datový formát s naměřenými hodnotami a také rychle graficky zobrazit průběh měření v reálném čase.

## 4.2.2 Výběr aplikací a zprovoznění komunikace

Rozhodl jsem se tedy důkladně a detailně projít webový portál společnosti Rohde & Schwarz GmbH & Co., která je výrobcem a dodavatelem spektrálního analyzátoru, zda bych tam nenalezl alespoň nějaké malé vodítko, jak tuto otázku řešit. Pročetl jsem zde několik desítek článků a nakonec se mi podařilo najít konkrétní bezplatné aplikace, které by měly být schopny komunikovat s analyzátozem přes síťové rozhraní LAN. Po jejich stažení z portálu jsem provedl instalaci na notebook se 64 bitovým operačním systémem Windows 7 Home Edition, se kterým jsem prováděl veškeré testování vzdálené komunikace notebook – analyzátor. Jedná se o aplikace R&S TraceRecorder, R&S FSx RecordPlay, R&S RSCommander, R&S FreRes, které byly staženy z internetových stránek výrobce zařízení <http://www.rohde-schwarz.com>. Chtěl bych zde zdůraznit, že tyto aplikace je možné provozovat na 32 i 64 bitových desktopových operačních systémech Windows.

Po instalaci aplikací v prvotní fázi jejich testování se mi nepodařilo s analyzátozem spojit, nastavil jsem klíčové parametry a LAN konfiguraci, ale aplikace zobrazovaly chybové hlášky, chyba neexistující knihovny visa.dll, chyby síťové komunikace (zařízení na síti není možné najít). Po množství neúspěšných pokusů a bezvýsledném hledání na internetu mi nezbývalo nic jiného, než se obrátit na dodavatele měřicího přístroje, který se mnou ochotně konzultoval možnou variantu řešení.

Pro bezproblémové spojení jednotlivých aplikací s přístrojem je nutné mít nainstalovány další podpůrné knihovny z internetových stránek <http://joule.ni.com/nidu/cds/view/p/id/2251/lang/en>, konkrétně skupinu knihoven NI-VISA 5.0.3 od firmy National Instruments, instalační soubor s názvem visa503full.exe (instalaci jsem provedl s defaultním nastavením) a dále aktualizaci knihovny Microsoft Visual C++ 2012 (vc\_redist\_x86.exe pro 32 bitový a vc\_redist\_x64.exe pro 64 bitový operační systém Windows) staženou ze stránek <http://www.microsoft.com/en-us/download>. Všechny tyto instalační soubory se nachází na přiloženém CD v adresáři Knihovny. Po instalaci výše uvedených knihoven a otestování spojení byla ve všech uvedených aplikacích komunikace s přístrojem úspěšně navázána. Dále jsem již nezaznamenal žádné výrazné problémy v síťové komunikaci.

Z výše uvedených aplikací jsem po jejich pečlivém otestování vybral dvě, které podrobně popisují a ty splňují podmínku bezproblémové vzdálené spolupráce s analyzátozem po LAN síti. Dále uvádím i možnost komunikace s využitím vzdálené plochy, která má určitě také své nesporné výhody.

## 4.2.3 Licenční podmínky

Aplikace R&S TraceRecorder, R&S FSx RecordPlay, R&S RSCommander, R&S FreRes poskytované společností Rohde & Schwarz GmbH & Co lze využívat ve spojení s měřidlem bezplatně.

Knihovny NI-VISA 5.0.3 od společnosti National Instruments lze používat bezplatně pouze k produktům NI. Ve spojení se zařízeními třetích stran, je zapotřebí mít zakoupenou NI-VISA Deployment License. Vysoká škola báňská má zakoupenou NI multilicenci, je tedy možné dle vyjádření zástupce firmy National Instruments, veškerý NI software využívat pro nekomerční a výzkumnou činnost v rámci školní licence bezplatně.

#### 4.2.4 Kompatibilita aplikací s operačními systémy Windows

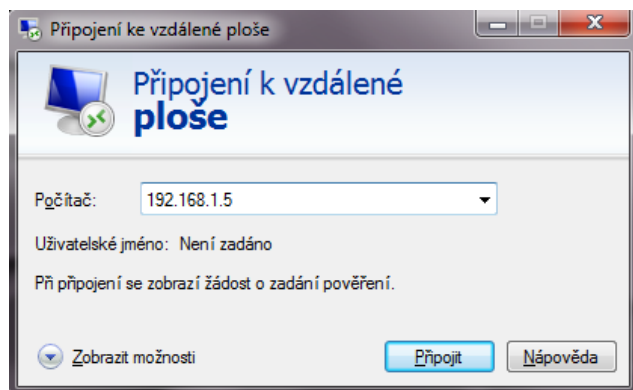
Jednotlivé instalace, zprovoznění a testování R&S aplikací i důležitých podpůrných knihoven, jsem prováděl na 64 bitovém operačním systému Windows 7. Nezaznamenal jsem žádné problémy, které by souvisely s jejich nesprávnou funkčností (např. problémy v komunikaci s analyzátozem při měření) či kompatibilitou.

S výhledem k budoucímu použití jsem otestoval také funkčnost výše uvedených aplikací i knihoven s v současnosti nabízeným 64 bitovým operačním systémem Windows 8.1, kdy jsem nezaznamenal také žádné výraznější problémy.

Na závěr bych chtěl zde uvést ještě použitý hardware, na kterém byly prováděny veškeré činnosti (instalace, testy, měření) související s tvorbou této diplomové práce. Jedná se o notebook ACER Aspire 7739ZG s procesorem Intel P6200, 4 GB RAM, harddisk WD 640 GB Blue S-ATAII.

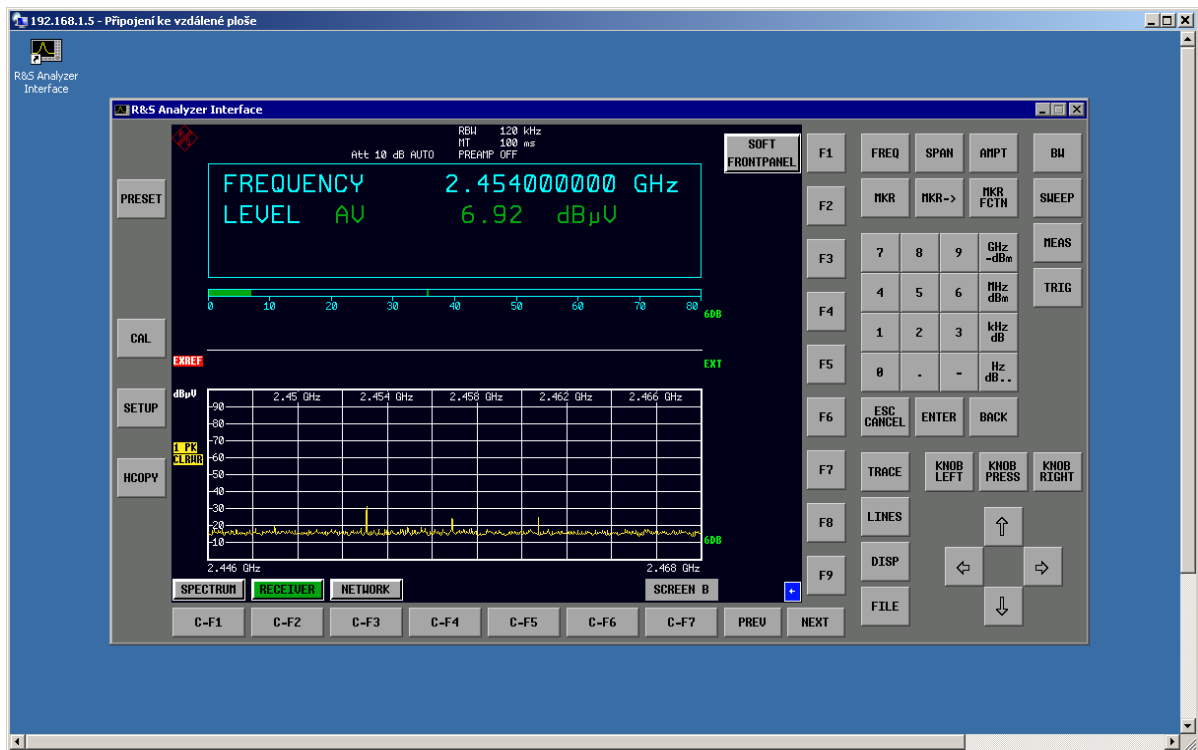
#### 4.2.5 Realizace vzdáleného připojení s použitím vzdálené plochy (RDP)

Pro vzdálené ovládání analyzátoru z počítače přes LAN síť je možné použít tzv. vzdálenou plochu, přes komunikační protokol RDP (port 3389).



Obr. 4.3: Připojení ke vzdálené ploše

V konfiguračním menu analyzátoru je zapotřebí před navázáním vzdálené komunikace nastavit přihlašovací údaje, tedy jméno a heslo. Nastavení se provede přes menu: *SETUP* → *GENERAL SETUP* → *NEXT* → *SOFT FRONTPANEL*. Ponechal jsem výchozí nastavení, kterým je shodné přihlašovací jméno a heslo: instrument. Po navázání připojení s použitím aplikace vzdálená plocha na obr. 4.3, jsme vyzváni k zadání uživatelského jména a hesla, proběhne vzdálené přihlášení uživatele do Windows XP Embedded. Na obrazovce analyzátoru vidíme automatické odhlášení uživatele (v jeden čas může být přihlášen pouze jeden uživatel). Na počítači či notebooku se zobrazí hlavní panel přístroje, který je možné ovládat podobným způsobem, jako za pomoci tlačítek přímo na přístroji. Jistou výhodou tohoto typu vzdáleného připojení (ovládání) je možnost namapovat lokální disky počítače nebo notebooku přímo v operačním systému analyzátoru a ukládat zde měřená data. Nastavení této funkce provedeme v úvodním přihlašovacím okně aplikace vzdálené plochy, kdy stisknutím rozbalovacího menu *Zobrazit možnosti* zvolíme podmenu *Místní prostředky* a zde sekci *Místní zařízení a prostředky*, pomocí tlačítka *Další* označíme písmeno jednotky pevného disku počítače či notebooku, ze kterého provádíme připojení. Tímto nastavením se nám v operačním systému analyzátoru namapuje a zobrazí vybraný pevný disk, na který můžeme přímo přes LAN síť ukládat naměřená data. Ukázka obrazovky se vzdáleným připojením pomocí převzetí vzdálené plochy je na obr. 4.4.



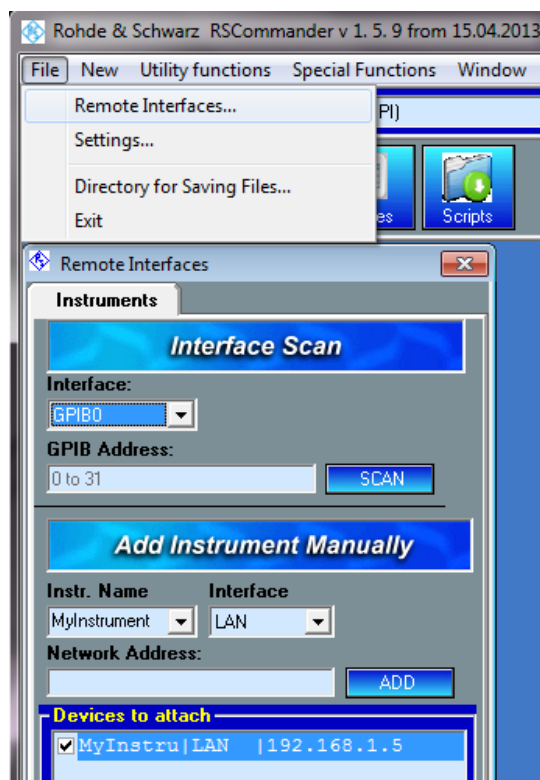
Obr. 4.4: Vzdálená plocha analyzátoru ESPI 7

## 4.3 Realizace vzdálené komunikace s použitím R&S software

### Aplikace RSCommander

Aplikaci RSCommander je možné použít pro online grafický záznam průběhu měření (jeho uložení v grafické podobě), či uložení datového textového souboru, kde jsou jednotlivé sloupce s hodnotami odděleny středníkem, jedná se o formát *csv*, tento datový formát je možné importovat a dále s ním pracovat např. v aplikaci Microsoft Excel.

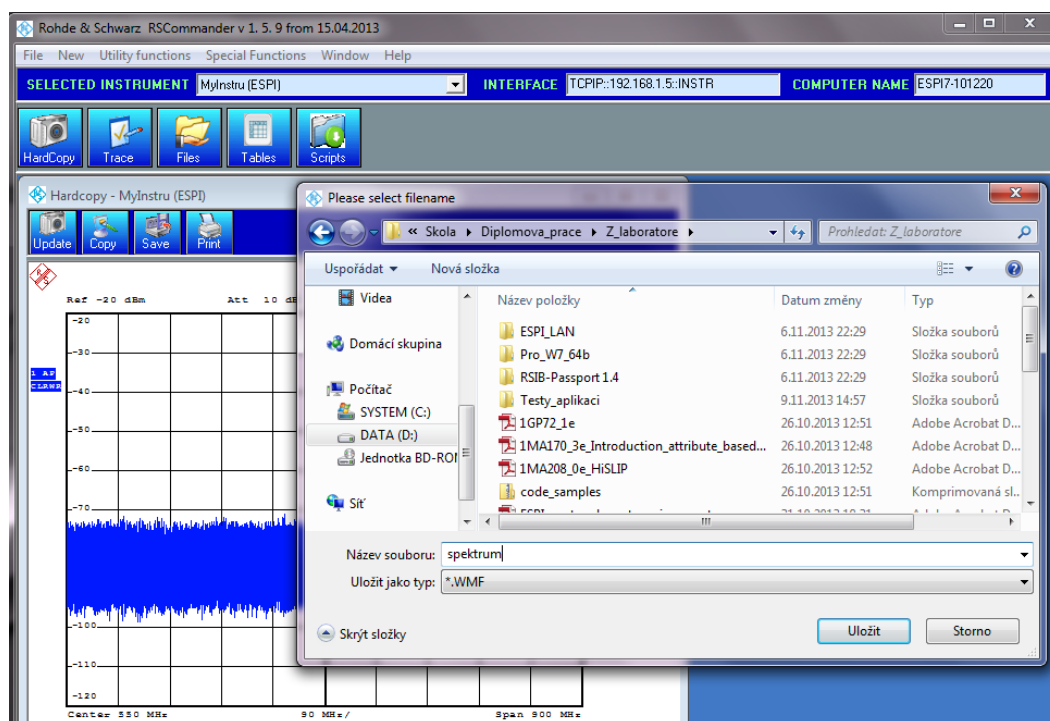
- ❖ Nastavení síťové konfigurace v aplikaci RSCommander pro úspěšné připojení k analyzátoru ESPI 7 pomocí LAN sítě se provede v menu *Remote Interfaces* pomocí tlačítka *ADD*, kdy je zapotřebí přidat IP adresu analyzátoru do sekce „*Devices to attach*“, v našem případě se jedná o IP adresu 192.168.1.5. Musíme také zkontrolovat, aby v nastavení *Interface* byla vybrána LAN a v *Instr. Name* ponecháme výchozí výběr na MyInstrument, na obr. 4.5.



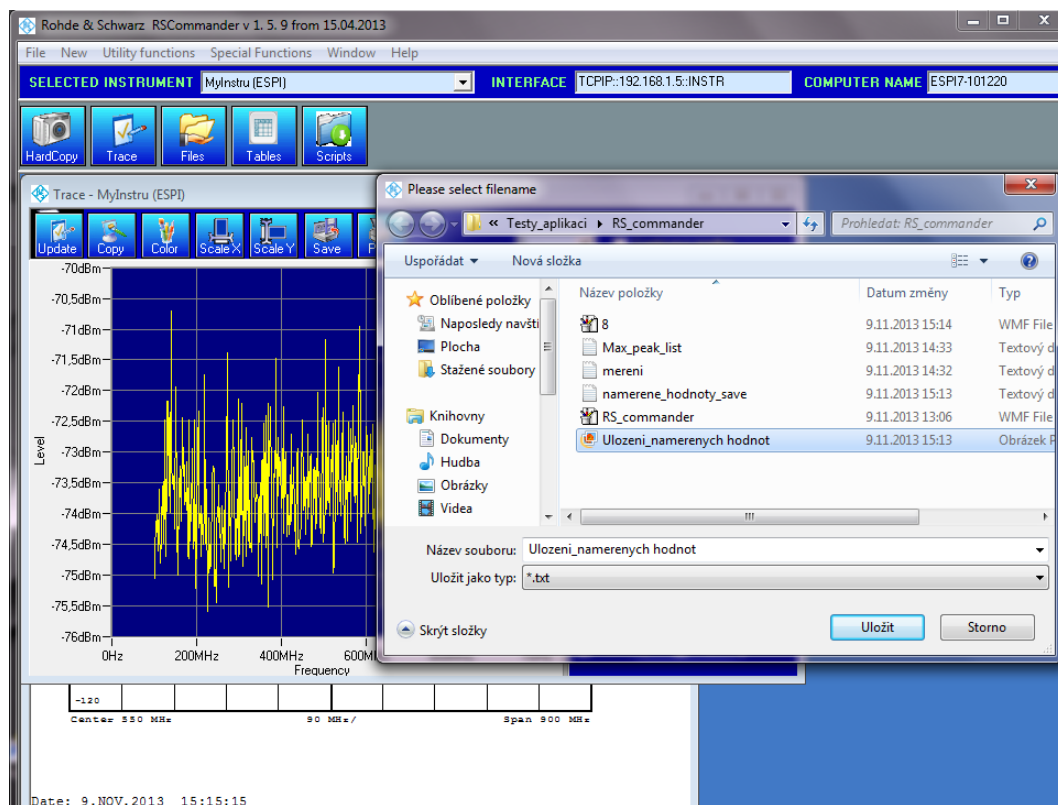
Obr. 4.5: Nastavení síťové konfigurace v aplikaci RSCommander



- ❖ V případě použití menu *HardCopy*, můžeme uložit obrázek právě probíhajícího měření, kdy použijeme ikonu *Save*. Jedná se o uložení grafu (formát wmf) online měření přímo do zvoleného adresáře počítače či notebooku, ukázkou vidíme na obr. 4.6.  
Ikona *Copy* zkopíruje obrázek přímo do schránky, kdy je možné provést pak vložení například do aplikace Microsoft Word, či do grafického softwaru např. Malování.
- ❖ K uložení naměřených dat použijeme menu *Trace*. Aplikace umožňuje uložení textového souboru s naměřenými daty přímo do počítače či notebooku. Použijeme ikonu *Save* nebo můžeme data uložit do schránky ikonou *Copy* a potom je následně vložit např. do předem vytvořeného prázdného textového souboru. Příklad uložení hodnot z měření je na obr. 4.7.



Obr. 4.6: Uložení obrázku právě probíhajícího měření v menu *HardCopy*



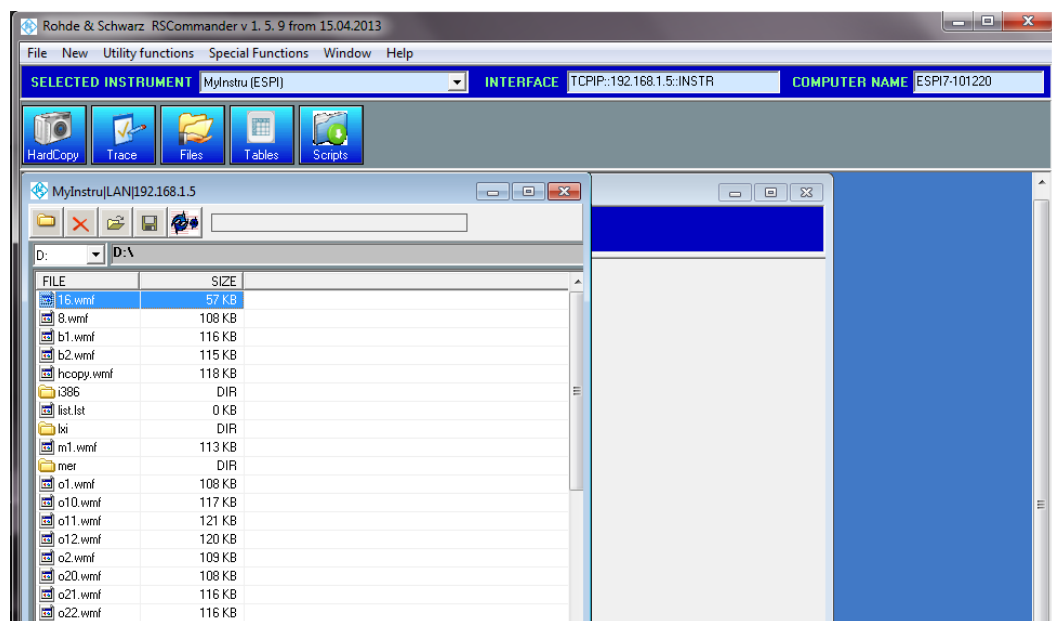
Obr. 4.7: Uložení dat v textovém formátu právě probíhajícího měření v menu Trace

Ukázka datové struktury textového souboru s naměřenými daty (hodnoty jsou v jednotkách Hz a dBm) je uvedena níže. Soubor se vytvoří po uložení ikonou *Save* v menu *Trace*:



```
100000000; -72.3876190185547
101800000; -73.7555847167969
103600000; -73.9393768310547
105400000; -73.3874206542969
107200000; -73.768669128418
```

Jak již bylo zmíněno, naměřená data jsou ve formátu csv (sloupce oddělené středníkem), velmi snadno je lze tedy otevřít (importovat) a dále zpracovat aplikací Microsoft Excel.

- ❖ Pro uložení souborů z probíhajících měření, které se fyzicky nachází na disku D analyzátoru ESPI 7 je možné využít menu *Files*. Jedná se o situaci, kdy soubory při měření byly uloženy přímo na pevný disk analyzátoru a nyní je potřebujeme mít ihned k dispozici na svém počítači či notebooku, na obr. 4.8.



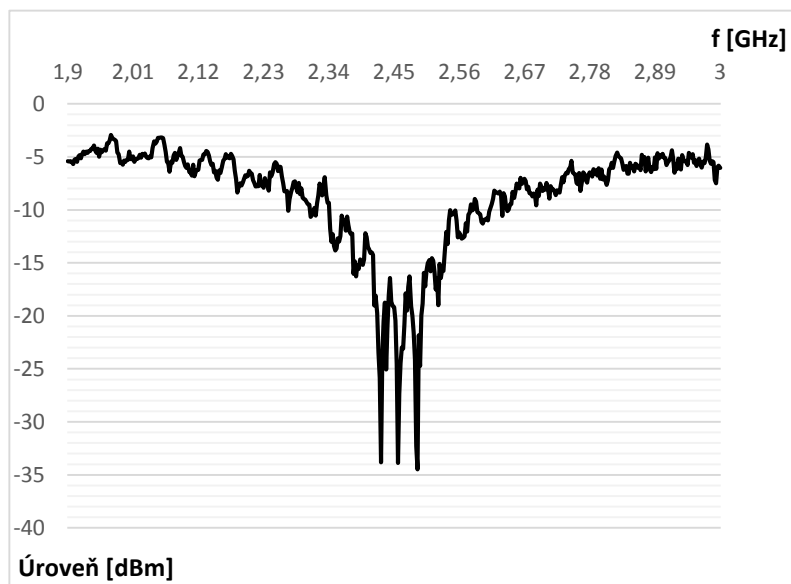
Obr. 4.8: Rychlé uložení souborů z disku analyzátoru do počítače

Soubor, který se nachází na pevném disku analyzátoru, je možné otevřít ikonou , spustí se automaticky aplikace Malování (či výchozí aplikace pro zpracování grafických souborů). Také je možné použít tlačítko s disketou , kdy se zobrazí adresářová struktura počítače a vybereme si místo (složku) k uložení.

- ❖ Menu *Tables* slouží pro uložení (zobrazení) maximálních naměřených hodnot, které jsou vyhodnoceny v průběhu měření (Marker). Ukázka obsahu takto vytvořeného textového souboru, kdy jednotlivé sloupce jsou odděleny tabelátorem je uvedena níže:

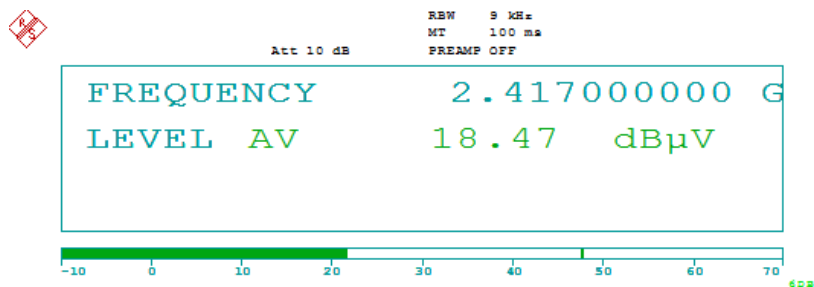
Marker	Frequency	Level
1	50 MHz	-60.44 dBm
2	65 MHz	-60.61 dBm
3	70 M Hz	-61.59 dBm
4	80 MHz	-59.84 dBm

Příklad grafického zpracování souboru s naměřenými hodnotami v Microsoft Excelu, které byly získány v aplikaci *RS Commander* (menu *Trace/Save*) ve formátu *csv*, je znázorněn na obr. 4.9.



Obr. 4.9: Ukázka grafu z naměřených hodnot

Využití funkce *HardCopy*, tedy kopie obrazovky analyzátoru v grafické podobě při měření elektrického blízkého pole  $E$  u všesměrové antény TP-LINK TL-ANT2405C, kde vidíme naměřenou hodnotu přímo v aplikaci s možností rychlého uložení na pevný disk je na obr. 4.10. Analyzátor je nyní nastaven v režimu *Receiver*. K ukázce měření byla použita sonda RS E02 z měřicí sady sond HZ-15 na obr. 4.11. Anténa byla připojena k Wi-Fi routeru ASUS RT-N10, který byl nastaven pro vysílání ve Wi-Fi pásmu 2,4 GHz na 2. kanálu tedy 2,417 GHz (na analyzátoru bylo provedeno zadání frekvence pomocí tlačítka *RECEIVER FREQUENCY* a číselné klávesnice). Sonda byla připojena přes redukci na vstup přijímače RF INPUT.



Obr. 4.10: Použití funkce *HardCopy* v aplikaci *RSCommander*



Obr. 4.11: Ukázka měření elektrického blízkého pole  $E$  pomocí sondy RS E02

### **Aplikace FreRes**

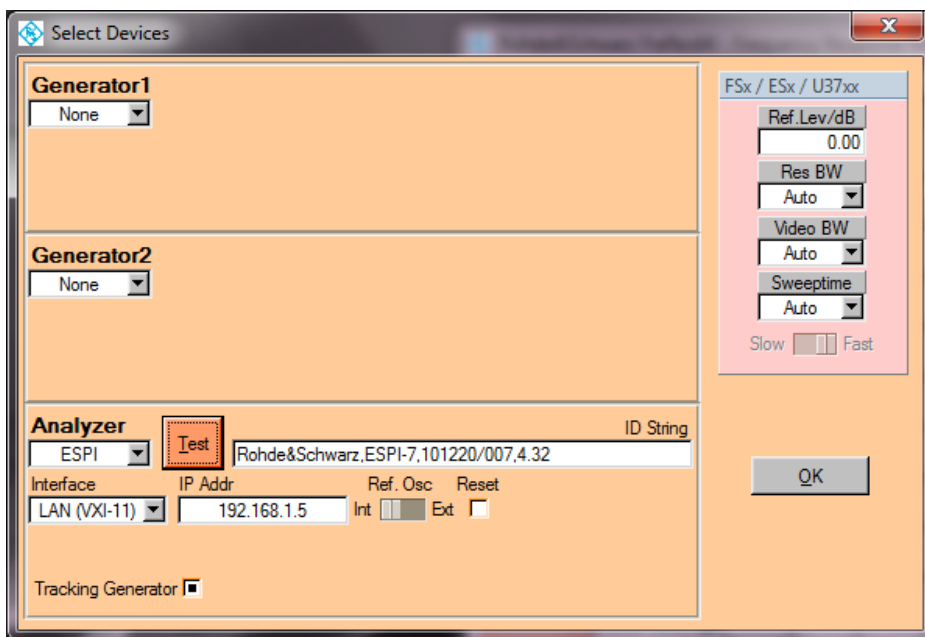
Aplikace umožňuje realizovat měření pomocí analyzátoru přímo na počítači, kdy vzájemná komunikace probíhá po LAN síti. Program dokonale simuluje průběh měření a obrazovku analyzátoru. Pro veškerá testování byla použita verze aplikace 4.4.1, kterou zde popisují. Na přiloženém CD jsou také uloženy instalační soubory v současnosti nejnovější verze 5.0.2, pro její bezproblémový chod je zapotřebí mít instalovanou aktualizaci knihovny Microsoft Visual C++ 2012 (instalační soubor se nachází na přiloženém CD v adresáři Knihovny).

Po spuštění aplikace nejdříve provedeme rychlé načtení konfigurace z připraveného souboru, který má textový formát. Vzor konfiguračního souboru s názvem *nastaveni.cfg*, použitého pro testování, se nachází v adresáři RS\_FreRes na přiloženém CD. Soubor se vytvoří tak, že se provede prvotní nastavení konfigurace po stisknutí tlačítka *Devices*, tzn. typu analyzátoru (ESPI), typu interface (LAN VXI-11), IP adresa (v našem případě 192.168.1.5), zatrhneme políčko *Tracking Generator*, potom klikneme na tlačítko *Test*. V případě, že proběhlo úspěšné navázání komunikace, zobrazí se vpravo od tlačítka přesný typ analyzátoru. Nyní můžeme zvolit v horním menu aplikace *File* → *SaveAs* a uložit tuto konfiguraci do *cfg* souboru. Zobrazení konfigurace po načtení již vytvořeného souboru za

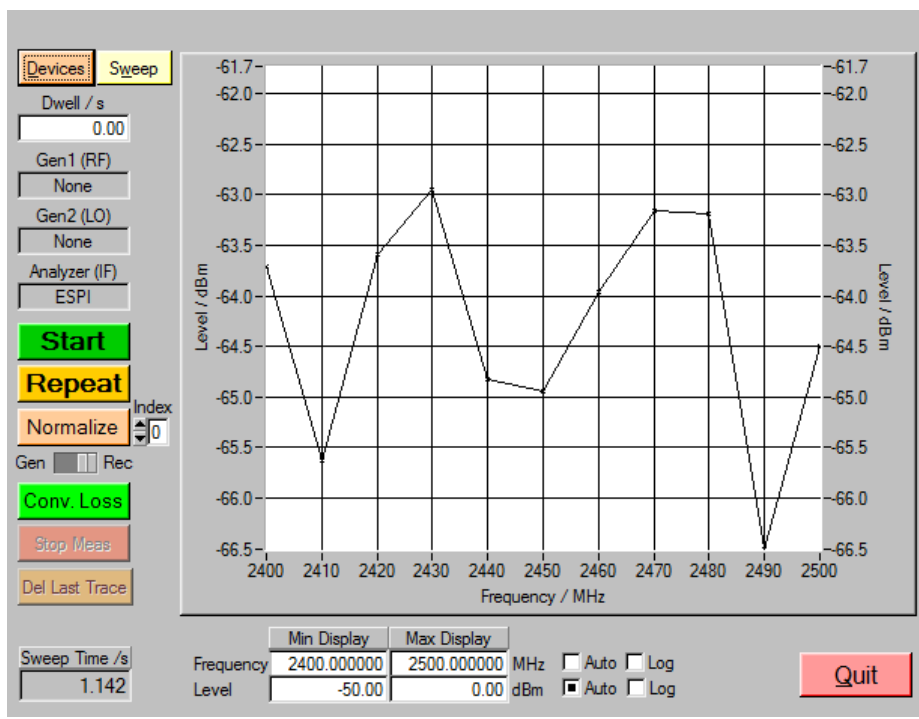
použití menu *File* → *Open* ukazuje obr. 4.12. Stisknutí tlačítka *Test* musíme provést i nyní, abychom otestovali komunikaci s analyzátořem, doplní se také název a typ zařízení, se kterým aplikace navázala vzdálenou komunikaci.

Za použití tlačítka *Sweep* nastavíme konkrétní rozsahy měření. Dále provedeme nastavení rozsahů frekvence a výkonu pro zobrazení. Do konfiguračního souboru, o kterém pojednával předchozí odstavec, můžeme uložit jednotně i ostatní nastavení, které zde provádíme. Postačí, když uložení konfigurace provedeme nakonec až po tomto kroku. Aplikaci budeme mít tak velmi rychle nastavenou pro tento typ měření. Tlačítkem *Start* pak spustíme vlastní měření, ukázkou vidíme na obr. 4.13. Zobrazený graf je možné pomocí funkce „Zkopírovat do schránky“ uložit do grafického softwaru nebo Microsoft Wordu. Program umožňuje uložit hodnoty měření také do datového souboru, který má textový formát. Tyto data potom zpracujeme např. programem Microsoft Excel. Tlačítkem *Normalize* můžeme „normalizovat“ nastavení výchozí hodnoty úrovně pro měření na 0 dBm.

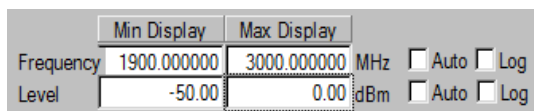
Měřicí rastr na hlavní obrazovce aplikace je možné ještě upravit z pohledu rozsahu frekvence, úrovně signálu, popř. logaritmické stupnice, ukázkou nastavení je na obr. 4.14.



Obr. 4.12: Zobrazení konfigurace po načtení cfg souboru



Obr. 4.13: Ukázka průběhu měření v aplikaci FreRes



Obr. 4.14: Detail nastavení měřicího rastru

Příklad struktury datového souboru s naměřenými hodnotami:

Repetition Count: 1

Level Sweep Count: 1

Measurement Count: 21

2400.000000 -63.710

2410.000000 -65.622

2420.000000 -63.597

2430.000000 -62.945

## 5 Návrh laboratorních úloh

### 5.1 Měření koeficientu odrazu antén s aplikací R&S FreRes

#### 5.1.1 Zadání

- ❖ S využitím SWR můstku ZRB 2 realizujte měření koeficientu odrazu pomocí spektrálního analyzátoru ESPI 7 u panelové antény JPA-9 P a širokopásmové antény VULB 9163.
- ❖ Měření proveďte dvěma způsoby, nejprve přímo na analyzátoru a potom vzdáleně na počítači s použitím aplikace R&S FreRes s využitím LAN sítě.

#### 5.1.2 Teoretický úvod

Měření velikosti (fáze) koeficientu odrazu u napájecích vedení antén hraje podstatnou roli při určení míry jejich přizpůsobení. Za tímto účelem je při měření s analyzátozem použit SWR můstek, který umožňuje vyhodnotit napájecí poměr mezi zpětnou a dopřednou vlnou. Hovoříme zde o tzv. součiniteli odrazu, kdy tuto zpětnou ztrátu představuje rozdíl mezi dopředným a odraženým výkonem. Většinou se uvádí v jednotkách dB.

Analyzátor ESPI 7 je složen ze dvou hlavních částí, generátoru signálu (konektor GEN OUTPUT) a analyzátoru, kam přivádíme měřený signál (RF INPUT). Protože se jedná o jeden celek, analyzátor předem ví, jaký typ signálu má na vstupu očekávat. Změny naměřeného signálu oproti předpokládanému (zkreslení zkoumaným obvodem) tvoří frekvenční a fázovou charakteristiku, které jsou výstupem analýzy.

Propojení analyzátoru s počítačem pomocí LAN sítě, instalace potřebných komunikačních knihoven (ovladačů) a použití R&S softwaru, umožňuje provádět měření po výchozí kalibraci (konfiguraci) přímo na počítači či notebooku. V praxi to znamená, že máme naměřená data ihned k dispozici, jak v grafické podobě, tak formou hodnot v předem definovaném formátu (např. csv). Tyto datové soubory je potom možné dále zpracovat např. pomocí aplikace Microsoft Excel.

SWR můstek ZRB 2 je zde použit pro měření energie, která je odražena od zátěže (měření tzv. koeficientu odrazu). Část signálu odražena z antény přes SWR můstek zpět, kdy velikost závisí na výši koeficientu odrazu měřeného zařízení.



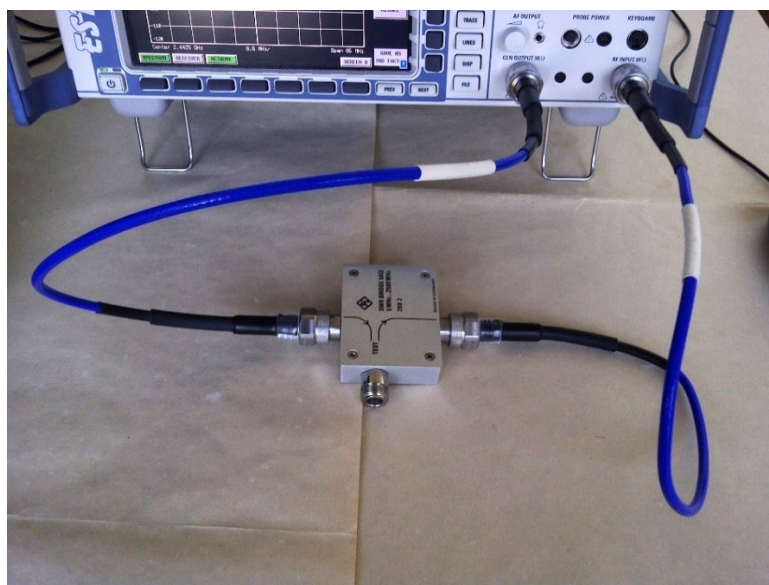
### 5.1.3 Příprava a kalibrace měření

1. Přijímač spektrálního analyzátoru nastavte do režimu *Spectrum* → *Network*, jak ukazuje obr. 5.1.



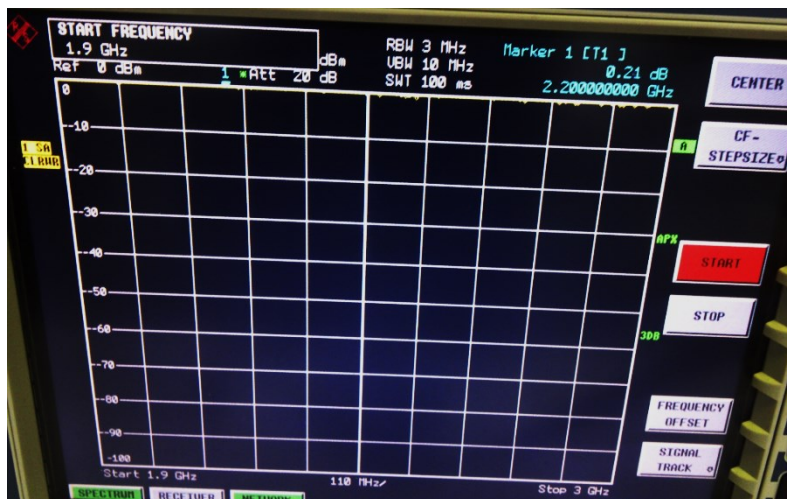
Obr. 5.1: Spektrální analyzátor v režimu *Spectrum* → *Network*

2. Připojte můstek ZRB 2, k zapojení využijte připravené propojovací kabely, jak ukazuje obr. 5.2. Na signálový vstup můstku připojte výstup generátoru signálu spektrálního analyzátoru (GEN OUTPUT 50  $\Omega$ ), výstup můstku připojte na vstup přijímače spektrálního analyzátoru (RF INPUT 50  $\Omega$ ) a konektor s označením TEST (pro připojení testované antény) ponechte nyní nezapojen.



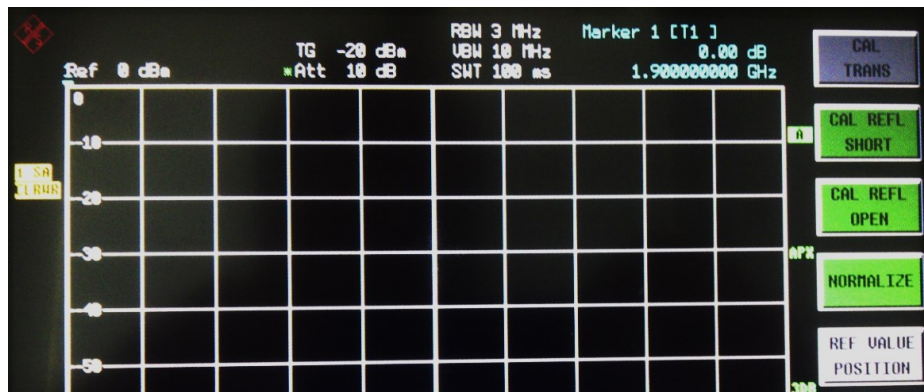
Obr. 5.2: Připojení můstku ZRB 2 na výstup generátoru a vstup přijímače

3. Nastavte frekvenční osu (Fstart a Fstop), jedná se o zadání počátku a konce frekvenčního rozsahu pro měření. Pro zadání frekvence použijte tlačítko *FREQ*, následně tlačítka na obrazovce *START* (počáteční frekvence) a *STOP* (konečná frekvence), na obr. 5.3.



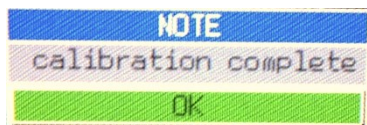
Obr. 5.3: Nastavení frekvenční osy

4. Nastavte a potom zkontrolujte v menu *AMPT* (amplituda) výstupní výkon tracking generátoru. Výchozí nastavená hodnota TG je -20 dBm, toto nastavení ponecháme.
5. Před začátkem měření koeficientu odrazu je nutné provést kalibraci, jedná se o kalibry OPEN a SHORT. Nahrďte měřený objekt kalibrem OPEN, kdy v menu *NETWORK* → *SOURCE CAL* vyberte z menu položku *CAL REFL OPEN* a tímto proved'te kalibraci. Nahrďte měřený objekt kalibrem SHORT, kdy v menu *NETWORK* → *SOURCE CAL* vyberte položku *CAL REFL SHORT* a tímto proved'te kalibraci, jak je znázorněno na obr. 5.4.



Obr. 5.4: Provedení kalibrace před měřením

V případě, že bude kalibrace provedena správným způsobem, zobrazí se informační okno o jejím úspěšném provedení, obr. 5.5. Tlačítkem *NORMALIZE* nastavte referenční úroveň pro měření na 0 dBm.



*Obr. 5.5: Kalibrace proběhla úspěšně*

6. Nyní můžete postupně připojovat měřené objekty (antény) na konektor můstku s označením TEST, jak ukazuje obr. 5.6, na obrazovce uvidíte frekvenční závislost koeficientu zpětného odrazu.

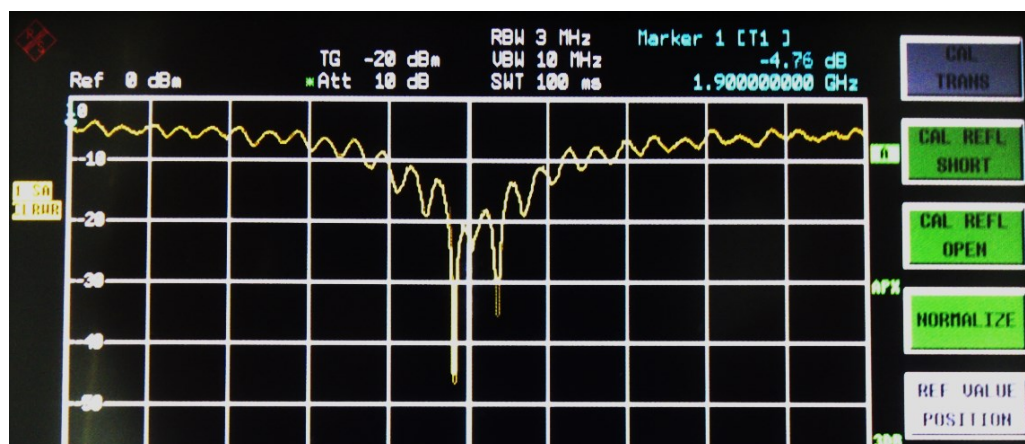


*Obr. 5.6: Připojení měřené antény k můstku ZRB 2*

#### 5.1.4 Průběh měření

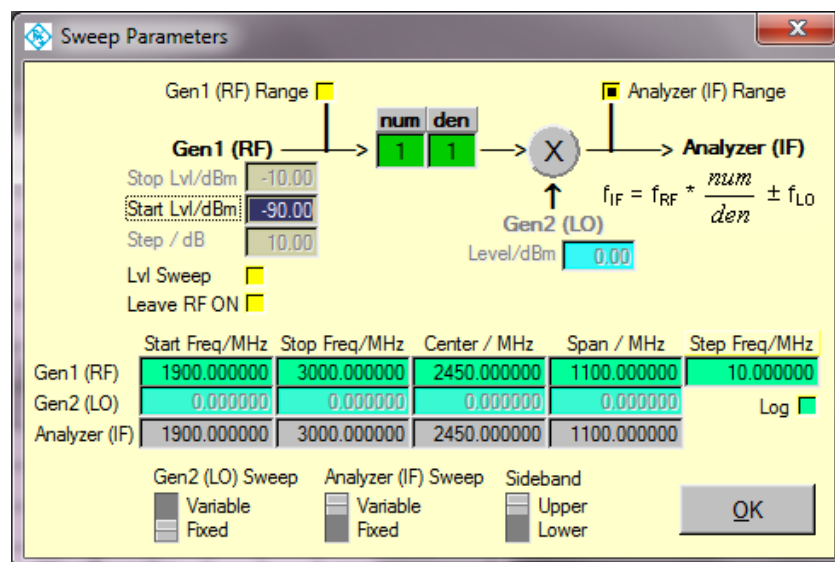
- ❖ Měření koeficientu odrazu u panelové antény JPA-9 P

Zapojil jsem anténu na konektor TEST můstku a nejdříve jsem sledoval průběh měření přímo na analyzátoru. Hodnoty odraženého signálu na obrazovce analyzátoru ESPI 7 pro předem zvolený frekvenční rozsah 1,9 až 3 GHz ukazuje obr. 5.7. Anténa je určena dle katalogového listu [10] pro frekvenční pásmo 2,4 až 2,485 GHz, proto jsem zvolil měřicí rozsah s dostatečnou rezervou.



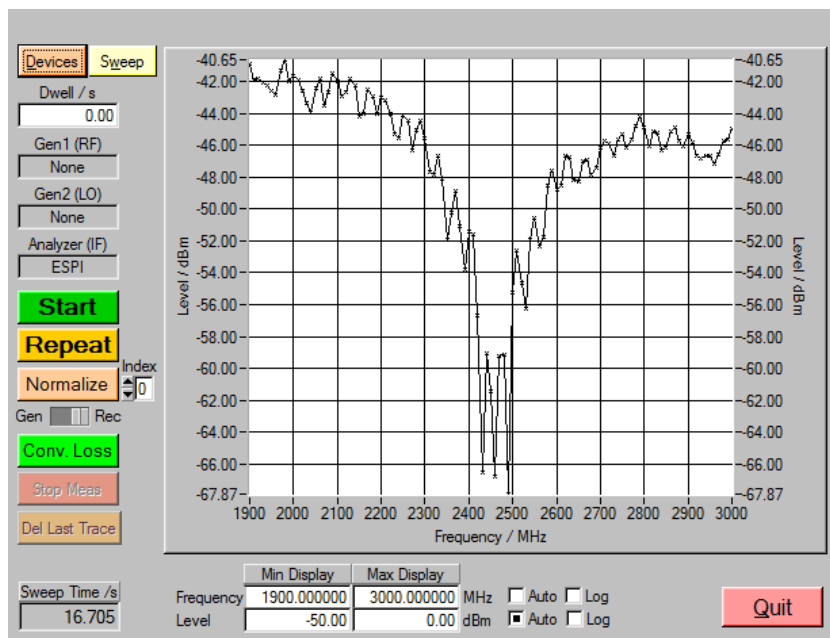
Obr. 5.7: Hodnoty odraženého signálu u panelové antény JPA-9 P na obrazovce analyzátoru

Následně jsem provedl stejný typ měření s využitím aplikace *FreRes* pro nastavený rozsah frekvenčního pásma 1,9 až 3 GHz. Před samotným měřením bylo nutné načtení konfigurace z předem připraveného *cfg* souboru (tlačítko *Devices*) a nastavení frekvenčního rozsahu (tlačítko *Sweep*), obr. 5.8. Měření jsem potom zahájil tlačítkem *Start*. Průběh signálu ukazuje obr. 5.9.



Obr. 5.8: Nastavení konfigurace - měřicího rozsahu

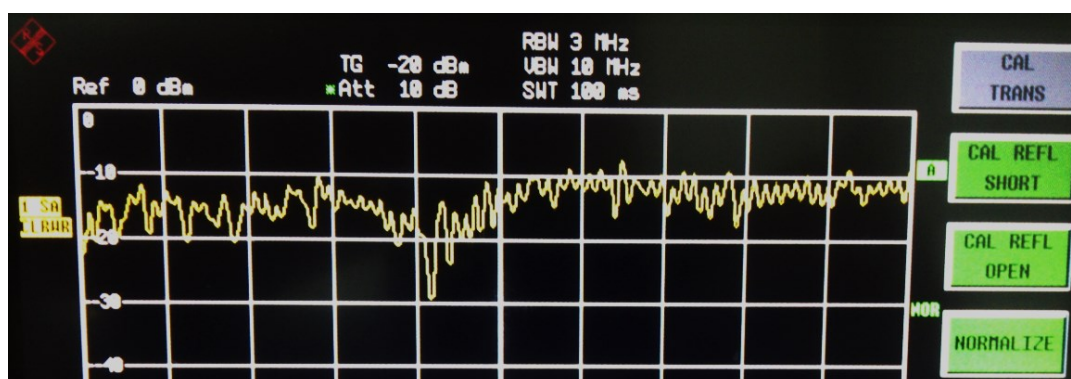




Obr. 5.9: Hodnoty odraženého signálu u panelové antény JPA-9 P v aplikaci FreRes

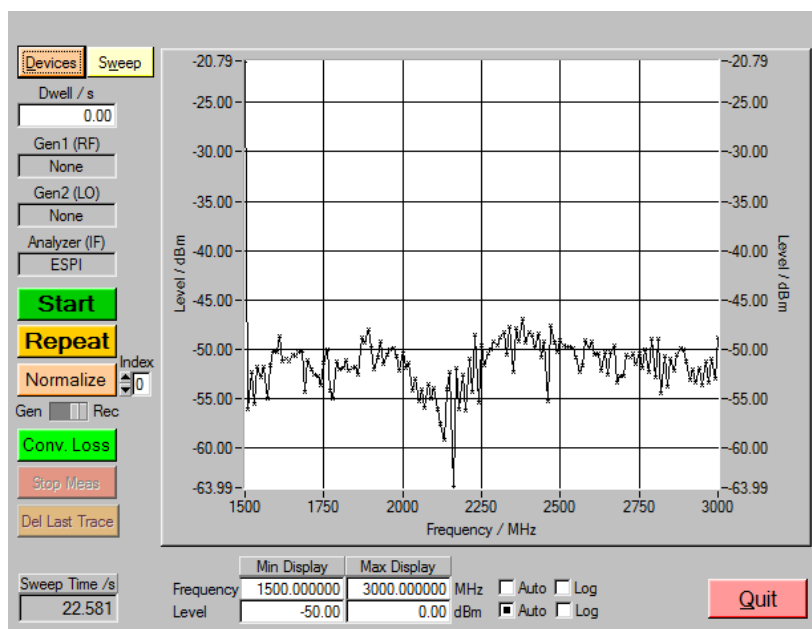
#### ❖ Měření koeficientu odrazu u širokopásmové antény VULB 9163

Průběh měření jsem nejdříve sledoval přímo na obrazovce analyzátoru. Hodnoty odraženého signálu na obrazovce analyzátoru ESPI 7 pro předem zvolený frekvenční rozsah 1,5 až 3 GHz ukazuje obr. 5.10. Anténa je určena dle katalogového listu [8] pro pásmo 30 MHz až 3 GHz, kdy pro měření jsem zvolil přibližně horní polovinu.



Obr. 5.10: Hodnoty odraženého signálu u širokopásmové antény VULB 9163 na analyzátoru

Realizace stejného typu měření s využitím aplikace *FreRes* pro nastavený rozsah frekvenčního pásma 1,5 až 3 GHz je vidět na obr. 5.11.



Obr. 5.11: Hodnoty odraženého signálu u širokopásmové antény VULB 9163 v aplikaci *FreRes*

### 5.1.5 Závěr

V této laboratorní úloze jsem si otestoval měření koeficientu odrazu, nejdříve přímo na analyzátoru ESPI 7 a potom vzdáleně na počítači s použitím aplikace R&S *FreRes*. Z naměřených hodnot odraženého signálu u panelové antény JPA-9 P je zřejmý optimální frekvenční rozsah, pro který je anténa určena (činitel odrazu je nejnižší), tedy pro kmitočty 2,4 až 2,5 GHz. Anténa VULB 9163 je širokopásmová, její použitelný frekvenční rozsah odpovídá 30 MHz až 3 GHz. Měření jsem v tomto případě prováděl v rozsahu od 1,5 do 3 GHz, kdy z výsledků měření je patrná přibližně stejná úroveň odraženého signálu v celém rozsahu pro který, je daná anténa určena. V aplikaci R&S *FreRes* bylo měření v obou případech provedeno bez kliknutí na tlačítko *Normalize* před vlastním měřením, v případě stisknutí by měření bylo vztaženo k referenční hodnotě 0 dBm. Výhodou aplikace R&S *FreRes* je potom rychlé zpracování naměřených hodnot přímo na počítači.

## 5.2 Měření koeficientu odrazu antény s aplikací R&S RSCCommander

### 5.2.1 Zadání

- ❖ S využitím SWR můstku ZRB 2 realizujte měření koeficientu odrazu pomocí spektrálního analyzátoru ESPI 7 u panelové antény JPA-9 P.
- ❖ Měření proveďte vzdáleně na počítači s použitím aplikace R&S RSCCommander s využitím LAN sítě. Naměřené výsledky prezentujte nejdříve graficky, následně proveďte uložení souboru s hodnotami ve formátu *csv* do počítače, z těchto potom sestrojte graf v aplikaci MS Excel.

### 5.2.2 Teoretický úvod

Měření velikosti (fáze) koeficientu odrazu u napájecích vedení antén hraje podstatnou roli při určení míry jejich přizpůsobení. Za tímto účelem je při měření s analyzátozem použit SWR můstek, který umožňuje vyhodnotit napájecí poměr mezi zpětnou a dopřednou vlnou. Hovoříme zde o tzv. součiniteli odrazu, kdy tuto zpětnou ztrátu představuje rozdíl mezi dopředným a odraženým výkonem. Většinou se uvádí v jednotkách dB.

Analyzátor ESPI 7 je složen ze dvou hlavních částí, generátoru signálu (konektor GEN OUTPUT) a analyzátoru, kam přivádíme měřený signál (RF INPUT). Protože se jedná o jeden celek, analyzátor předem ví, jaký typ signálu má na vstupu očekávat. Změny naměřeného signálu oproti předpokládanému (zkreslení zkoumaným obvodem) tvoří frekvenční a fázovou charakteristiku, které jsou výstupem analýzy.

Propojení analyzátoru s počítačem pomocí LAN sítě, instalace potřebných komunikačních knihoven (ovladačů) a použití R&S softwaru, umožňuje provádět měření po výchozí kalibraci (konfiguraci) přímo na počítači či notebooku. V praxi to znamená, že máme naměřená data ihned k dispozici, jak v grafické podobě, tak formou hodnot v předem definovaném formátu (např. *csv*). Tyto datové soubory je potom možné dále zpracovat např. pomocí aplikace Microsoft Excel.

SWR můstek ZBR 2 je zde použit pro měření energie, která je odražena od zátěže (měření tzv. koeficientu odrazu). Část signálu odražena z antény přes SWR můstek zpět, kdy velikost závisí na výši koeficientu odrazu měřeného zařízení.

### 5.2.3 Příprava a kalibrace měření

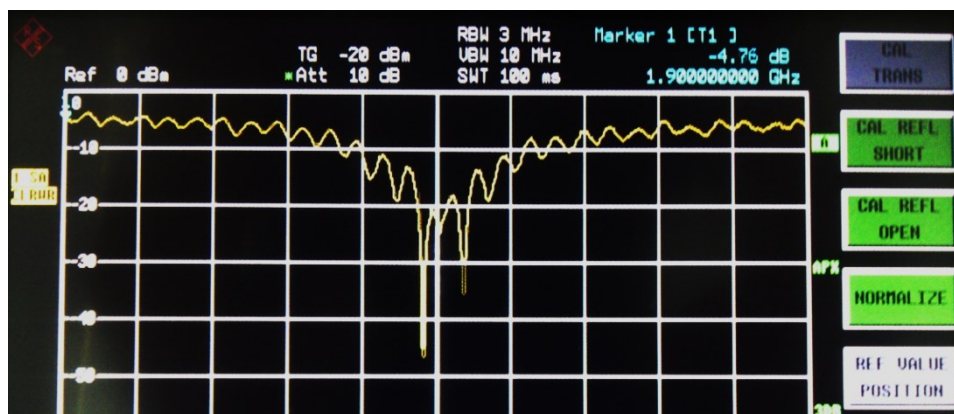
1. Přijímač spektrálního analyzátoru nastavte do režimu *Spectrum* → *Network*, jak ukazuje obr. 5.1.
2. Připojte můstek ZRB 2, k zapojení využijte připravené propojovací kabely, jak ukazuje obr. 5.2. Na signálový vstup můstku připojte výstup generátoru signálu spektrálního analyzátoru (GEN OUTPUT 50  $\Omega$ ), výstup můstku připojte na vstup přijímače spektrálního analyzátoru (RF INPUT 50  $\Omega$ ) a konektor s označením TEST (pro připojení testované antény) ponechte nyní nezapojen.
3. Nastavte frekvenční osu (Fstart a Fstop), jedná se o zadání počátku a konce frekvenčního rozsahu pro měření. Pro zadání frekvence použijte tlačítko *FREQ*, následně tlačítka na obrazovce *START* (počáteční frekvence) a *STOP* (konečná frekvence), na obr. 5.3.
4. Nastavte a potom zkontrolujte v menu *AMPT* (amplituda) výstupní výkon tracking generátoru. Výchozí nastavená hodnota TG je -20 dBm, toto nastavení ponecháme.
5. Před začátkem měření koeficientu odrazu je nutné provést kalibraci, jedná se o kalibry OPEN a SHORT. Nahrďte měřený objekt kalibrem OPEN, kdy v menu *NETWORK* → *SOURCE CAL* vyberte z menu položku *CAL REFL OPEN* a tímto proved'te kalibraci. Nahrďte měřený objekt kalibrem SHORT, kdy v menu *NETWORK* → *SOURCE CAL* vyberte položku *CAL REFL SHORT* a tímto proved'te kalibraci, jak je znázorněno na obr. 5.4.  
V případě, že bude kalibrace provedena správným způsobem, zobrazí se informační okno o jejím úspěšném provedení, obr. 5.5. Tlačítkem *NORMALIZE* nastavte referenční úroveň pro měření na 0 dBm.
6. Nyní můžete postupně připojit měřené objekty (antény) na konektor TEST můstku, jak ukazuje obr. 5.6, na obrazovce uvidíte frekvenční závislost koeficientu zpětného odrazu.

### 5.2.4 Průběh měření

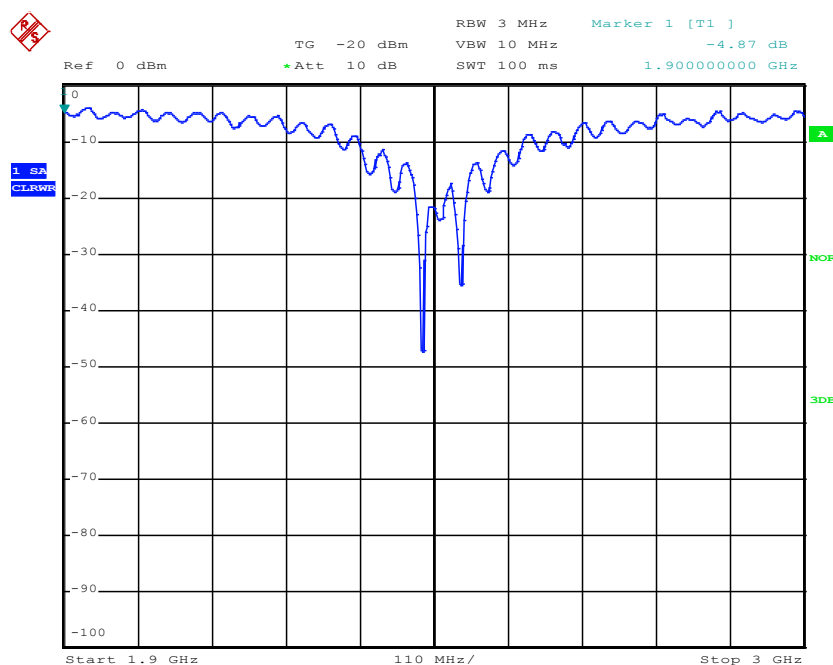
#### ❖ Měření koeficientu odrazu u panelové antény JPA-9 P

Po nastavení a kalibraci analyzátoru jsem zapojil anténu na konektor TEST můstku. Na obrazovce analyzátoru byl vidět výsledek měření zpětného odrazu, jak ukazuje obr. 5.12. Na notebooku jsem pak spustil aplikaci R&S RSCommander, kde jsem nejdříve pomocí ikony HardCopy vytvořil kopii obrazovky analyzátoru v grafické podobě a soubor jsem uložil, jak vidíme na obr. 5.13.





Obr. 5.12: Hodnoty odraženého signálu u panelové antény JPA-9 P na obrazovce analyzátoru



Date: 29.MAR.2014 13:46:43

Obr. 5.13: Hodnoty odraženého signálu u panelové antény JPA-9 P v aplikaci RSCOMMANDER

Aplikace RSCOMMANDER umožňuje jednak grafickou podobu zobrazení průběhů měření a uložení do počítače, ale také získání naměřených hodnot v datovém formátu, kde jednotlivé hodnoty jsou odděleny středníkem (formát *csv*). Vytvořil jsem tento typ souboru spuštěním ikony *Trace*

a následně tlačítka Save. Soubor jsem nazval *Data\_mereni\_JPA-9\_P.txt* a je obsahem příloženého CD. S použitím těchto hodnot jsem sestrojil graf v aplikaci Microsoft Excel na obr. 5.14. Graf je velmi přesný, protože celkový počet hodnot aplikací uložených do souboru je vyšší než 500.



Obr. 5.14: Graf z naměřených hodnot odraženého signálu u panelové antény JPA-9 P

### 5.2.5 Závěr

V této laboratorní úloze jsem si ověřil měření koeficientu odrazu u panelové antény JPA-9 P pracující v pásmu 2,4 GHz, kde jsem kromě měření na analyzátoru použil také aplikaci RSCommander využívající komunikaci přes LAN síť. Aplikace má určitě řadu výhod, protože v ní lze použít hned několik funkcí. Jedná se o funkci *HardCopy* na obr. 5.13, dále funkci *Trace*, která hned po spuštění zobrazí průběh měření shodný s obrazovkou analyzátoru, ikonou *Save* pak ihned uložíme několik stovek hodnot do textového souboru formátu *csv* a funkci *Tables*, která nám zobrazí maximální úrovně. Z grafického zobrazení i z uložených hodnot je zřejmé, že nejnížší hodnota odraženého signálu je na frekvenci 2,43 GHz (-43 dBm), což je přibližně střed pro frekvenční pásmo 2,4 GHz (kanál 5 a 6). Lze konstatovat, že použití tohoto druhu aplikací má určitě nesporný význam pro přesnost, rychlost a efektivitu zpracování měřených výsledků pro tento typ laboratorní úlohy.

## 6 Měření koeficientu odrazu u magnetické smyčkové antény

### 6.1 Úvod

V konzultačních hodinách se svým vedoucím diplomové práce mi bylo navrženo, zda bych pomocí spektrálního analyzátoru ESPI 7 zrealizoval měření koeficientu odrazu také u magnetické smyčkové antény, kterou vyrobil kolega Ján Matejčík v rámci jeho bakalářské práce. Měření s využitím SWR můstku ZRB 2 jsme provedli společně na analyzátoru. Pro rychlé uložení výsledků měření z obrazovky analyzátoru do souboru v grafickém formátu na pevný disk notebooku jsme potom využili aplikaci R&S RSCCommander, konkrétně funkci *HardCopy* a dále pomocí funkce *Trace* jsme uložili naměřené hodnoty v datovém formátu.

Magnetická smyčková anténa na obr. 6.1 je speciálním typem smyčkové antény. Obvod u klasické smyčkové antény je striktně roven její pracovní vlnové délce, pro kterou je navržena. Magnetická smyčková anténa používá obvod  $0,1$  až  $0,2 \lambda$ . Velkou předností kromě malých rozměrů je to, že má schopnost generovat a zpracovávat pouze magnetickou složku  $H$  elektromagnetického pole. Z toho vyplývá, že není citlivá vůči elektrické složce elektromagnetického pole (na různé typy rušení).

Tato anténa je složena ze tří základních bloků. Jedná se o hlavní smyčku, ladící kondenzátor a budící obvod.

Hlavní smyčku tvoří jeden závit (v našem případě z měděné trubky pro minimalizaci ztrát). Ladící neboli doladovací kondenzátor umožňuje změnu pracovního kmitočtu i ve větší míře. U vysílací antény smyčka představuje otevřený závit naprázdno, na konci smyčky se tedy objeví vysoké napětí (v závislosti na velikosti vysílacího výkonu). Velký důraz je tedy kladen na dielektrikum použitého kondenzátoru, na elektrickou pevnost vzduchové mezery. Budící obvod je obvykle tvořen vazební smyčkou, jde o menší smyčku, která je umístěna uvnitř hlavní smyčky naproti ladícímu kondenzátoru. Průměr indukční smyčky je obvykle  $\frac{1}{5}$  průměru hlavní smyčky, kdy doporučená vzdálenost mezi hlavní a vazební smyčkou je  $0$  až  $6$  cm.

Anténa je velmi oblíbená mezi radioamatéry hlavně pro její relativně malé rozměry oproti klasické anténě standardní délky např.  $0,5 \lambda$ . Další již zmíněnou předností je odolnost vůči silnému elektrickému rušení [11].



Obr. 6.1: Magnetická smyčková anténa

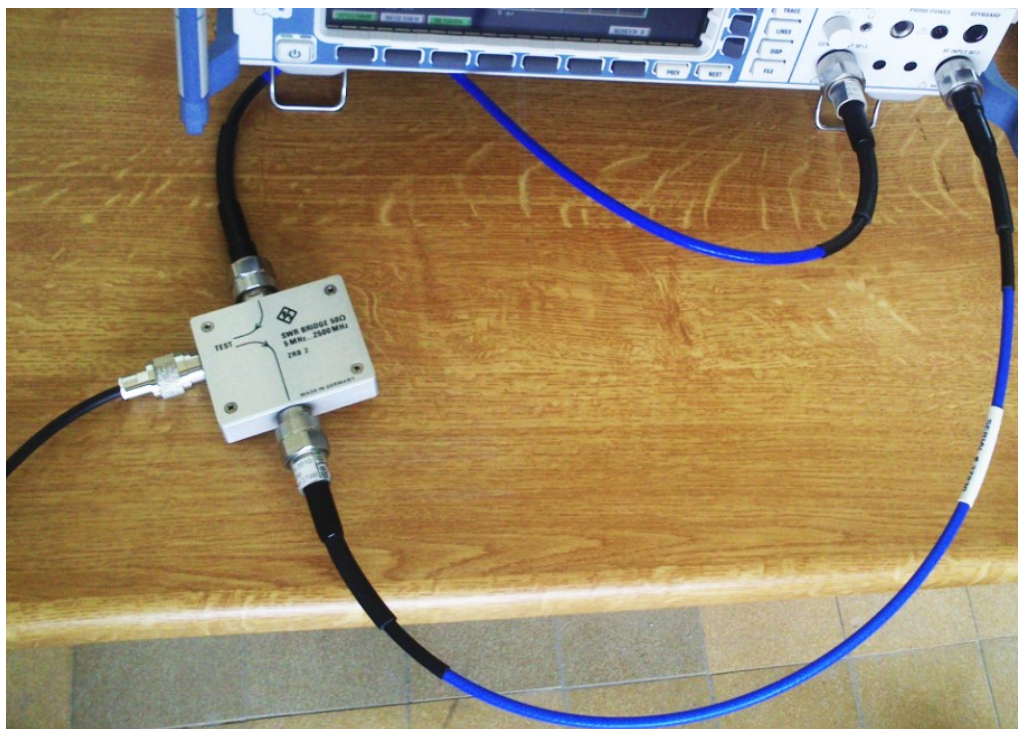
## 6.2 Příprava a kalibrace měření

Při přípravě měření s využitím můstku ZRB 2 jsme zvolili shodný postup, který je uveden u první laboratorní úlohy (odstavec 5.2):

- ❖ Přijímač spektrálního analyzátoru jsme nastavili do režimu *Spectrum* → *Network*.
- ❖ Připojili jsme vstup můstku k výstupu generátoru a výstup můstku na vstup přijímače analyzátoru pomocí připravených kabelů, konektor TEST jsme ponechali nezapojen.
- ❖ Zadali jsme počátek a konec frekvenčního rozsahu pro měření stisknutím tlačítka *FREQ* a potom pomocí tlačítek na obrazovce *START*, *STOP*.
- ❖ Nastavili jsme v menu *AMPT* výstupní výkon tracking generátoru.
- ❖ Před začátkem měření koeficientu odrazu jsme provedli kalibraci před měřením pomocí kalibrů OPEN a SHORT. *NETWORK* → *SOURCE CAL* vybrali jsme z menu položku *CAL REFL OPEN*, *NETWORK* → *SOURCE CAL* vybrali jsme z menu položku *CAL REFL SHORT*. Pak jsme použili tlačítko *NORMALIZE* k nastavení referenční úrovně pro měření na 0 dBm.
- ❖ Po kalibraci jsme již připojili měřenou anténu na konektor TEST můstku a realizovali měření.

### 6.3 Průběh společného měření

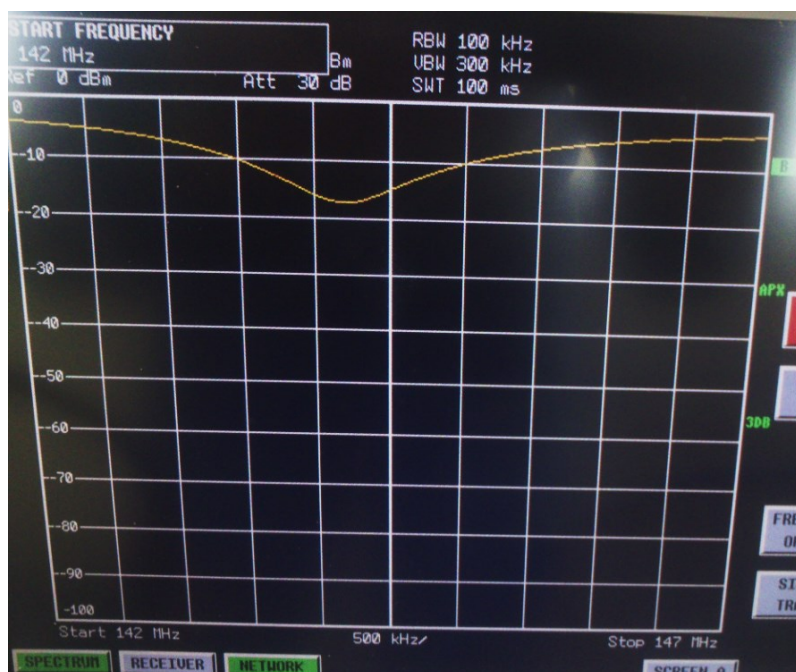
Po provedení přípravy a kalibrace měření podle postupu, který je uveden v předchozím bodě, jsme společně s kolegou připojili anténu na konektor TEST můstku ZRB 2, jak ukazuje obr. 6.2.



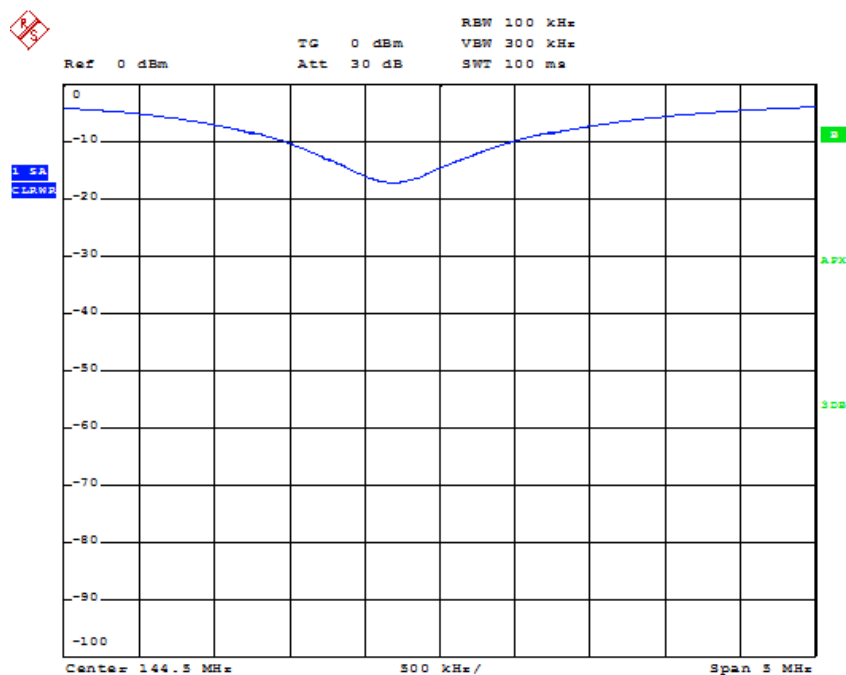
*Obr. 6.2: Zapojení SWR můstku ZRB 2, připojení antény na konektor TEST*

Před začátkem měření zpětného odrazu (před připojením antény na konektor TEST můstku), kolega anténu ještě jemně doladil na frekvenci 143,5 MHz s použitím měřidla RigExpert AA-520 (měření SWR). Nejlepších výsledků při této frekvenci jsme pak dosáhli při umístění antény do venkovních prostor mimo budovu.

Nejprve jsme měření provedli v laboratoři, kde jsme i přes veškerou snahu nedosáhli ideálních výsledků. Měření bylo do jisté míry ovlivněno prostředím laboratoře (možné odrazy, magnetické rušení aj.). Na frekvenci, která se blížila 143,5 MHz, na níž byla tato anténa vyladěna, odražený signál vykazoval hodnotu přibližně -18 dBm. Nižší hodnoty se nám díky vlivu prostředí laboratoře nepodařilo dosáhnout. Průběh odraženého signálu jsme nejprve sledovali na obrazovce analyzátoru, ukázku vidíme na obr. 6.3. Potom jsme na notebooku připojeného přes LAN síť k analyzátoru v aplikaci RSCommander použili funkci *HardCopy*, kdy jsme měli ihned k dispozici průběh signálu z obrazovky analyzátoru v grafickém formátu s možností uložení souboru na pevný disk, jak znázorňuje obr. 6.4.



Obr. 6.3: Výsledek prvního měření na obrazovce analyzátoru ESPI 7



Date: 21.MAR.2014 15:49:42

Obr. 6.4: Výsledek prvního měření v aplikaci RSCOMMANDER pomocí funkce HardCopy

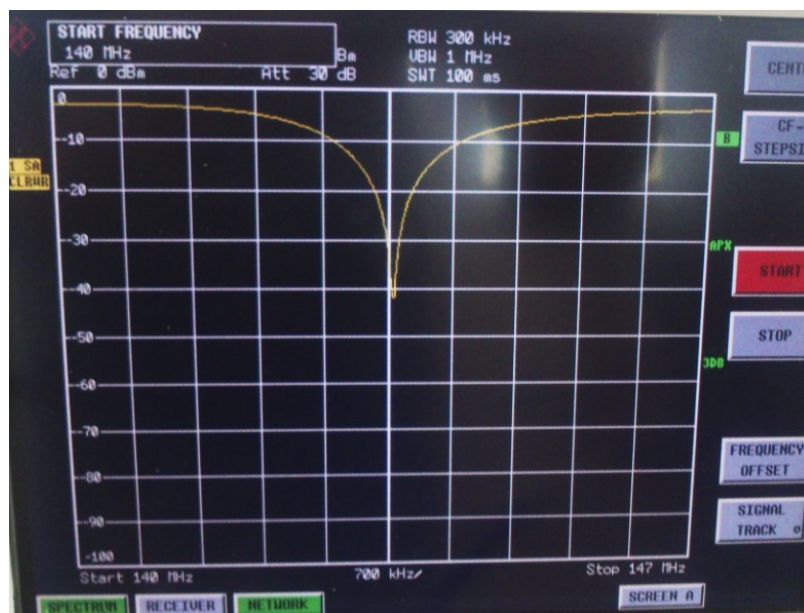


Při druhém měření jsme umístili anténu do venkovních prostor před budovu, abychom se vyhnuli některým jevům, které jej negativně ovlivňovaly, jak ukazuje obr. 6.5.

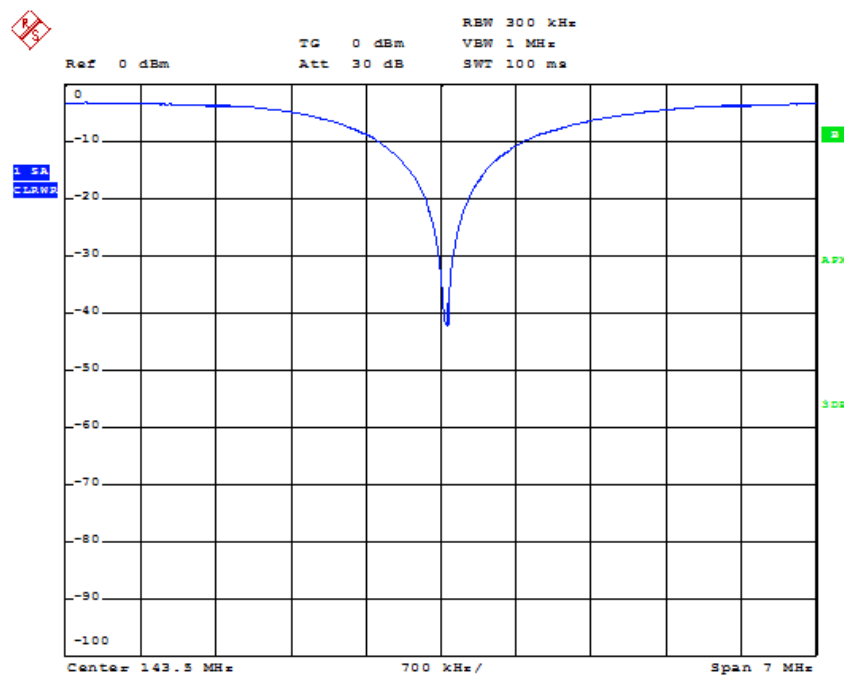


*Obr. 6.5: Anténa při druhém měření umístěná před budovou*

Při tomto měření jsme dosáhli výborných výsledků, kdy velikost odrazu signálu zpět z antény při frekvenci 143,5 MHz byla minimální, na obrazovce spektrálního analyzátoru na obr. 6.6 vidíme hodnotu přibližně -42 dBm. Z výsledku měření můžeme konstatovat, že anténa má výrazně úzkopásmový charakter a je nejlépe použitelná pro kmitočty 143 až 144 MHz. Do napájecího vedení se v uvedeném rozsahu vrací zpět minimální signál a největší část výkonu je vyzářena anténou do volného prostoru. Obr. 6.7 ukazuje grafický výsledek měření vytvořený v aplikaci RSCommander s použitím funkce HardCopy, kdy se jedná o identický průběh jako je na analyzátoru.



Obr. 6.6: Výsledek druhého měření na obrazovce analyzátoru ESPI 7

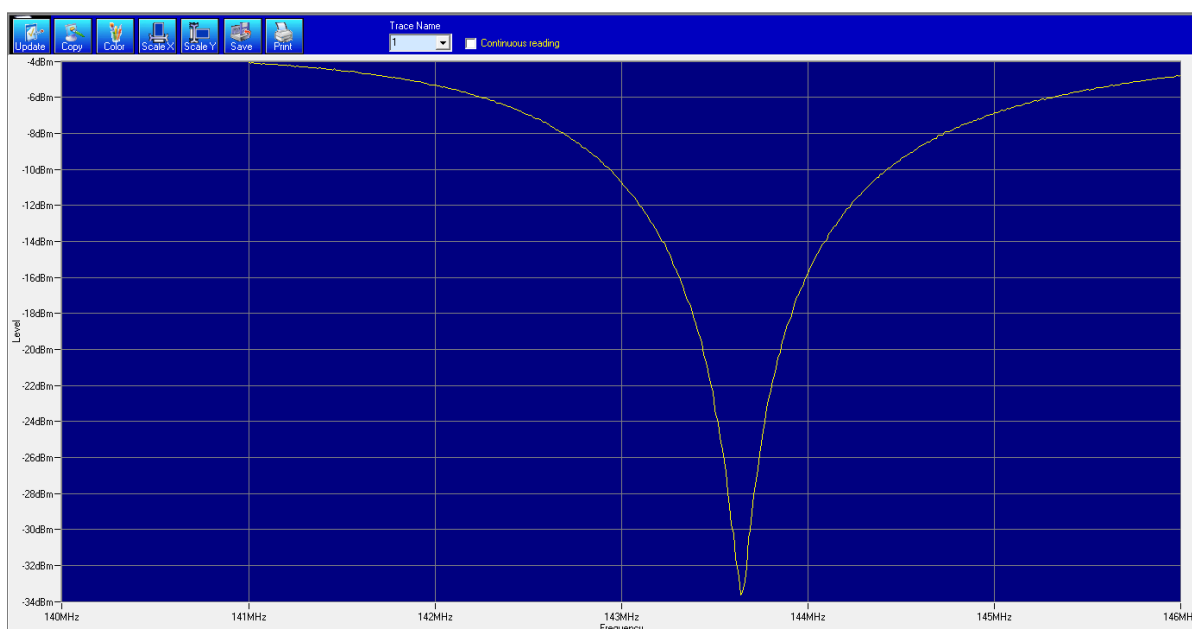


Date: 21.MAR.2014 15:43:32

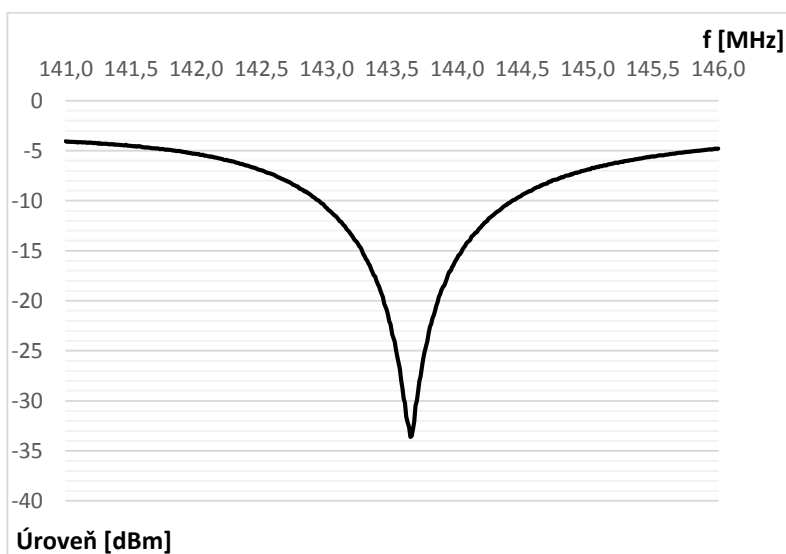
Obr. 6.7: Výsledek druhého měření v aplikaci RSCommander pomocí funkce HardCopy



Měření ve venkovních prostorech před budovou jsme zopakovali ještě jednou, tentokrát s cílem získat pomocí aplikace R&S RSCCommander (menu *Trace* → *Save*) na obr. 6.8 naměřené hodnoty ve formátu *csv*. Soubor s názvem *Data\_mereni\_antena\_143,5MHz.txt* je obsahem přiloženého CD. Z naměřených hodnot jsem pak jednoduše sestrojil graf v programu MS Excel, který je na obr. 6.9. Nyní jsme dosáhli také výborných výsledků, jež anténa vykazovala na kmitočtu přibližně 143,7 MHz.



Obr. 6.8: Zobrazení výsledku třetího měření v aplikaci RSCCommander při použití menu *Trace*



Obr. 6.9: Vytvořený graf z uložených naměřených hodnot při třetím měření

## Závěr

Cílem této práce bylo nejprve podrobně popsat fyzikální podstatu šíření elektromagnetických vln. V dalším kroku jsou uvedeny základní parametry spektrálních analyzátorů včetně obecného popisu a jejich rozdělení. Na základě detailního se seznámení s manuálem analyzátoru ESPI 7 byl vytvořen základní popis přístroje včetně příslušenství, které bylo použito při měření, tedy i při přípravě laboratorních úloh.

V praktické části jsem se zaměřil na realizaci vzdálené komunikace s analyzátozem ESPI 7 nejdříve s využitím protokolu RDP (vzdálená plocha) a potom s využitím bezplatného softwaru od výrobce, který jsem nainstaloval a testoval na notebooku s Windows 7. Na něm jsem potom prováděl veškerá měření. V práci popisuji otestovanou metodiku instalace a konfigurace aplikací i podpůrného softwaru nezbytného pro úspěšné navázání komunikace a činnosti s analyzátozem. Je zde důležité uvést a zhodnotit, jaké nesporné výhody přináší měření realizované na notebooku či počítači formou vzdálené komunikace přes LAN síť. S využitím uvedených aplikací jsou naměřená data ihned k dispozici pro další zpracování v grafických nebo analytických softwarech např. Microsoft Excel. K jejich dalšímu zpracování není zapotřebí provádět složité přípravy (převody formátů). Měření můžeme provádět rychle a efektivně několikrát za sebou. Prvotní konfigurace a nastavení parametrů před samotným měřením byla poměrně jednoduchá (v aplikaci R&S FreRes je možné si vytvořit konfigurační soubor a ten před měřením rychle načíst).

Laboratorní úlohy byly navrženy pro praktickou realizaci zpracování výsledků měření činitele zpětného odrazu antén v pásmu 2,4 GHz, kdy se spektrálním analyzátozem bylo komunikováno vzdáleně pomocí LAN sítě a instalovaného softwaru. Jsou v nich praktické ukázky získaných výsledků měření v grafické podobě s uložením na pevný disk počítače. Nechybí zde také příklad uložení naměřených hodnot do textového souboru (formát *csv*) a následný příklad tvorby grafu v aplikaci Microsoft Excel.

S kolegou Jánem Matejčíkem jsme ještě provedli měření na magnetické smyčkové anténě, kde jsme také použili aplikaci R&S RSCommander, která komunikuje s analyzátozem vzdáleně přes LAN síť. Naměřené výsledky jsou prezentovány v grafické i datové (textové) podobě.

Všechny stanovené cíle s vazbou na zadání diplomové práce byly splněny. Může tedy následovat uvedení popisovaných a prověřených řešení do denní praxe.

## Použitá literatura

- [1] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení: Skriptum VUT*. FEKT Brno, 2007.
- [2] PANKRÁC, V. *Předmět Elektromagnetické pole: Přednáška 11, 12*. KATEDRA ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE, ČVUT Praha. [online]. [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: [http://www.old.elmag.org/lib/exe/fetch.php/wiki:user:pankrac:x17tep:prednaska\\_11\\_12.pdf](http://www.old.elmag.org/lib/exe/fetch.php/wiki:user:pankrac:x17tep:prednaska_11_12.pdf)
- [3] SVAČINA, J. Základy elektromagnetické kompatibility (EMC). *Elektrorevue: Časopis pro elektrotechniku*. 2001. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01036/index.html>
- [4] HAASZ, V. SEDLÁČEK, M. *Elektrická měření, Přístroje a metody*. ČVUT, Praha 2005, ISBN 80-01-02731-7.
- [5] ROHDE&SCHWARZ. *Operating manual Vol.1*. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, 2009.
- [6] Katalogový list R&S®ZRB2 SWR Bridge, [online]. [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: [http://www.rohde-schwarz.com/en/product/zrb2-productstartpage\\_63493-10789.html](http://www.rohde-schwarz.com/en/product/zrb2-productstartpage_63493-10789.html)
- [7] Katalogový list R&S®HZ-15 Probe Set, [online]. [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: [http://www.rohde-schwarz.com/en/product/hz15-productstartpage\\_63493-8985.html](http://www.rohde-schwarz.com/en/product/hz15-productstartpage_63493-8985.html)
- [8] Katalogový list VULB 9163 TRILOG Broadband Antenna 30-3000 MHz
- [9] Katalogový list Indoor Omni-directional Antenna TL-ANT2405C, [online]. [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: <http://cz.tp-link.com/products/details/?categoryid=&model=TL-ANT2405C>
- [10] Katalogový list Panelová anténa JPA-9P, [online]. [cit. 2013-10-05]. Dostupné z: <http://cz.jirous.com/anteny-2,4ghz/jpa-9>
- [11] DVORSKÝ, M. *Laděná magnetická anténa*, článek [online]. [cit. 2014-04-01]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/0/magneticka-antena/>

## Seznam příloh

Součástí diplomové práce je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

- ❖ Data\_mereni\_anteny\_JPA-9\_P\_a\_VULB\_9163
- ❖ Data\_mereni\_Magneticka\_smyckova\_antena\_143.5MHz
- ❖ FSx\_Record\_Play
- ❖ Katalogove\_listy\_a\_techicke\_specifikace
- ❖ Knihovny
- ❖ RS\_Commander
- ❖ RS\_FreRes
- ❖ RS\_Trace\_Recorder